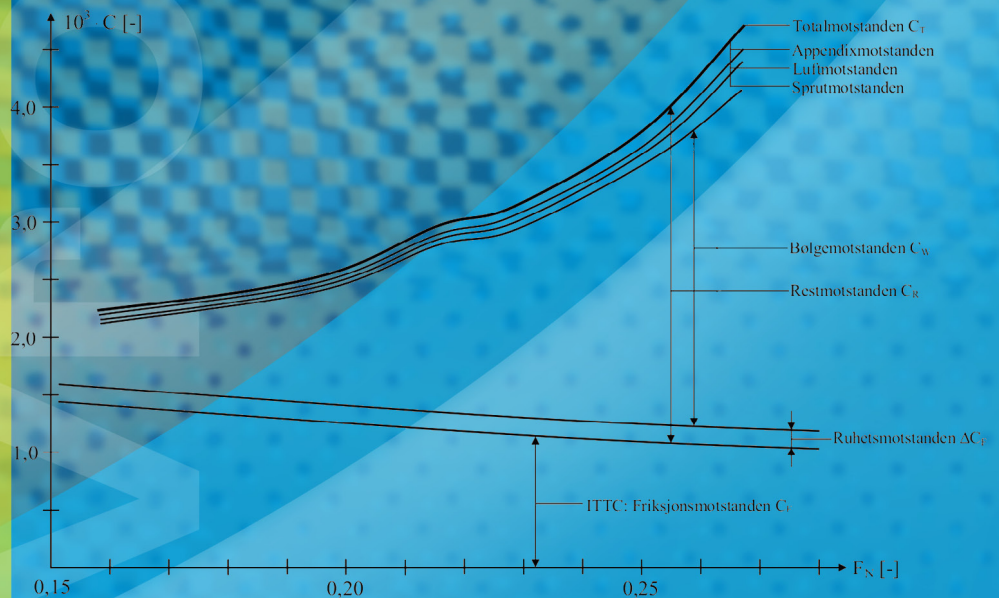




Forfatter: Håvard Holm

# Motstand og framdrift





**All transport, også transport til sjøs, gir luftforurensning. Det er derfor viktig å designe alle fartøy med så liten motstand mot bevegelse i vann som mulig.**

Det kreves tilførsel av energi for å drive skip og andre farkoster gjennom vannet, på samme måte som det kreves energi for å drive en bil framover på en vei. Hvor mye energi som må tilføres et fartøy, avhenger av motstanden som fartøyet møter i vannet og i luften, hvor langt det skal seile og i hvor stor grad den energien som tilføres, blir nyttiggjort fartøyet.

Redusert energibehov vil føre til mindre utslipp av CO<sub>2</sub> og miljøgifter. Innsats for å utforme energieffektive skip er dermed en innsats for både nærmiljøet og det globale klima. Transport ved hjelp av skip regnes allerede som en meget miljøvennlig måte å frakte både mennesker og gods på, men kan forbedres ytterligere.

I dette kapitlet skal vi konsentrere oss om forståelse og beregning/estimering av motstand og framdrift av skip. Beregningen av motstanden og valg av propell er en relativt kompleks oppgave. Beregningene legger grunnlaget for valg av blant annet maskineristørrelse, og er derfor en viktig del av prosjekteringsprosessen.

De vanligste propulsjonsinnretningene er propell, vannjet og seil. I denne boka fokuserer vi på konvensjonelle skip, og da er det i praksis propellen som er mest aktuell for å gi framdrift og som derfor gis størst plass.



# Motstand og framdrift

Har du noen gang prøvd å løpe i vann? Du klarer neppe å løpe særlig raskt. Dette skyldes at motstanden vi møter i vannet er mye større enn den motstanden vi møter i luften. Motstanden er en kraft som virker mot bevegelsesretningen, og siden motstanden i vannet er større enn i luften, må vi bruke mye mer krefter for å bevege oss med samme hastighet i vann enn tilfellet er på land.

Vi forstår dermed at mengden av energi som må tilføres et fartøy avhenger av motstanden fartøyet møter i vannet og i luften. Det vil være av stor interesse for oss å kunne bestemme motstanden på et skip.

Først ser vi på hvordan motstanden på en båt kan måles/bestemmes: La oss anta at en dag du og noen venner er ute på sjøen, treffer dere en fortvilet fisker i en liten båt som har fått garn i propellen. Dere tilbyr fiskeren å slepe båten hans inn til en brygge. En slepeline blir festet til båten hans og du får i oppgave å holde linen. Idet slepet starter, strammes slepelinen, og du vil merke at det er en trekkraft (et drag) i slepelinen som gjør at du må yte en motsatt rettet kraft for å holde den igjen. Trekkraften i slepelinen skyldes motstanden som fiskerens båt møter i vannet.

Dersom hastigheten økes, vil du merke at trekkraften/draget i slepelinen øker, og dette må bety at båtens motstand i vannet også øker. Draget i slepelinen kan man enkelt måle ved å feste slepelinen til en kraftmåler, for eksempel en fjærvækt av samme type som man benytter til å veie fisk på fisketur. Ved hjelp av vekten kan man måle trekkraften, det vil i praksis si motstanden, ved ulike slepehastigheter. Måledataene kan man plote opp i et motstandsdiagram som viser sammenhengen mellom motstand og hastighet. Det viser seg i praksis at motstanden øker vesentlig raskere enn lineært med hastigheten. Se undringsoppgave.



## Undringsoppgave:

Når hastigheten til et skip ligger over en viss grense (20-30 % av normal hastighet), kan vi tilnærmet anta at skipets motstand øker proporsjonalt med kvadratet av hastigheten. Videre kan vi anta at brenselforbruket er proporsjonalt med motstanden. Hvor stort er brenselforbruket pr. nautisk mil ved en hastighet lik 18 knop i forhold til forbruket ved 15 knop?

## MÅL.

### Etter å ha studert dette kapitlet skal du:

- Ha en oversikt over de viktigste motstandskomponentene som et skip møter under fart
- Kunne overføre modellmålinger til det virkelige skipet
- Ha oversikt over de forskjellige typer framdriftssystemer og hvordan de virker

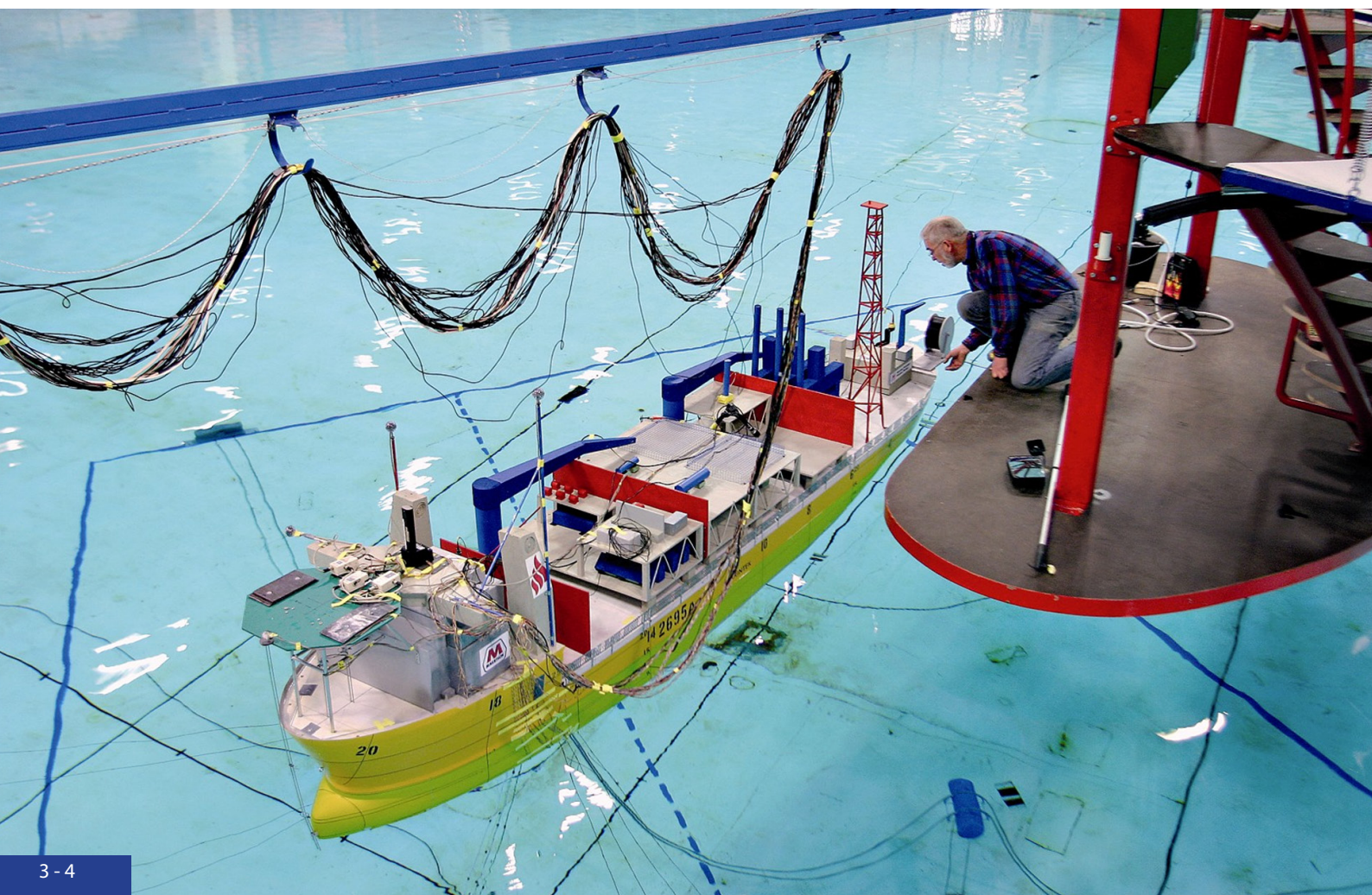


# Metoder for bestemmelse av motstand for skip

## Modellforsøk

Motstanden til et skip fastsettes normalt på grunnlag av modellforsøk. Modellforsøkene utføres i slepetanker med 200 - 300 m lengde, 10 - 12 m bredde, og en dybde på 4 - 6 m. Modellene som slepes er nøyaktige kopier av de virkelige skipene. De lages vanligvis med lengder på 3 - 8 m og slepes med modellhastigheter i området 2 - 8 m/s. Modellene festes til en slepevogn som drar dem gjennom vannet. En kraftmåler måler motstanden som virker på modellen, men også modellens trim kan måles i slike modellforsøk. Motstandsdataene som foreligger etter sleping av modellen ved ulike modellhastigheter (som tilsvarer bestemte hastigheter for fullskalaskipet), gjør oss i stand til å beregne motstanden på skipet som modellen er en forminsket kopi av. Det beste estimatet man kan få på et skips motstand er i dag å gjøre modellforsøk og skalere opp, som vist senere.

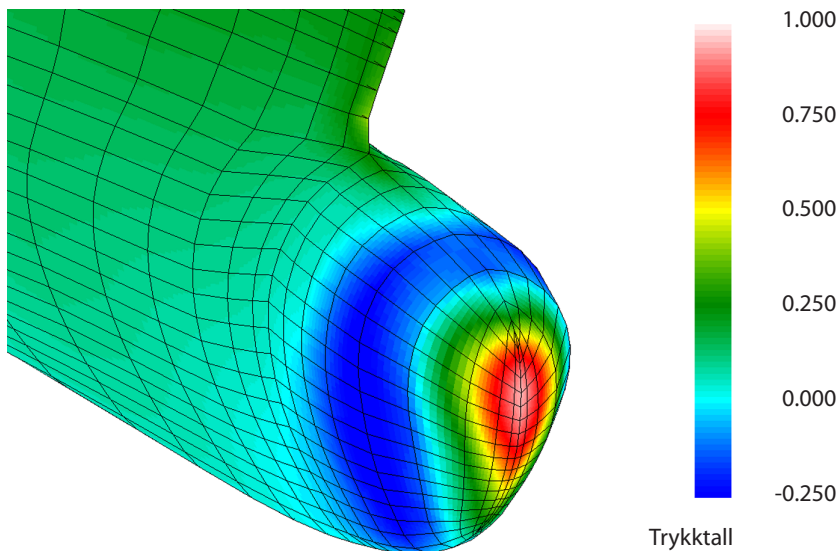
Modellforsøk brukes også til å teste skipets sjøgangsegenskaper (hvor mye skipet beveger seg i bølger), manøvreringsegenskaper (hvor lett er det å styre/kontrollere skipet), marine operasjoner (om man f. eks kan laste olje fra en plattform i en gitt sjøtilstand), framdriftsegenskaper (hvor stort dreiemoment/skyvkraft propellen vil kreve/yte) og mye annet.





## Numeriske metoder, computational fluid dynamics (CFD)

Store dataprogrammer kan benyttes for å simulere strømning rundt skip og plattformer. Vannet rundt legemet deles da inn i små celler og det settes opp ligninger for væskehastighet og trykk i cellene. Deretter beregnes krefter, blant annet motstanden. Ligningene er basert på bevarelse av masse og bevegelsesmengde. Metoden leder til ligninger med mange millioner ukjente og det er bare Norges kraftigste datamaskiner som kan brukes til å løse slike ligningssett.



Eksempel på simulering. Figuren viser trykkfordeling forårsaket av strømmingen rundt bulben på et skip. De viste trykktallene beskriver trykkene i forhold til en basisverdi. Stort tall svarer til høyt trykk, negativt tall til undertrykk.

## Empiriske metoder

Gjennom tidene er det gjort mange modellforsøk og fullskalaforsøk hvor man har målt motstand. Resultater fra slike forsøk er samlet og brukt til å lage formler som estimerer motstanden på lignende konstruksjoner. Input til slike formler er for eksempel hoveddimensjoner (lengde, bredde, osv.), blokkoeffisienter og lengde på bulb. Et slikt formelsett som er mye brukt, er laget av Holtrop. Dette er implementert i dataprogrammet "Freeship" og kan brukes til raskt å estimere motstanden på et skip som er under designing. Dette dataprogrammet vil bli omtalt senere.

## Motstand og øvrige designparametere

Det arbeides stadig mye med å utarbeide gunstige skrogformer som reduserer motstanden som skip møter i vannet. Skip med "liten" motstand er billigere i drift, da de benytter mindre drivstoff for å opprettholde samme hastighet. Reduserte drivstoffkostnader vil i fremtiden bli en viktigere konkurransefaktor enn tilfellet er idag, ettersom skipsfarten blir stadig sterkere preget av internasjonal konkurranse, økte brenselkostnader og synkende inntektsmarginer. Miljøbetraktninger er også meget sentrale i samme forbindelse. Ved utforming av skrog må man imidlertid også ta hensyn til andre forhold enn motstanden. Skrogets sjødyktighet, stabilitet, manøvrerbarhet og dødvekt er også viktige egenskaper ved skip, og den endelige skrogformen er derfor et resultat av en optimalisering av alle disse forholdene. Det er ikke sikkert at den endelige skrogformen nødvendigvis er optimal med hensyn på motstand.



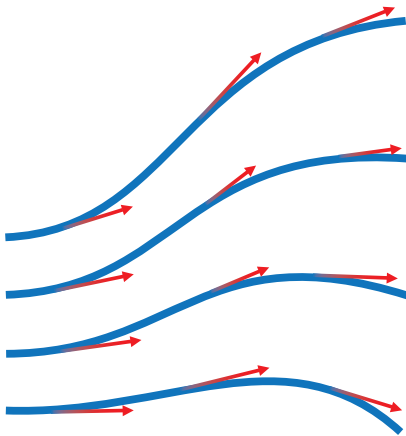
### Undringsoppgave:

Hvilke fordeler og ulemper tror du man får om man skal benytte en beregning på datamaskinen istedenfor modellforsøk?



# Grunnleggende hydrodynamikk

## Strømlinjer. Bernoullis ligning. Viskositet



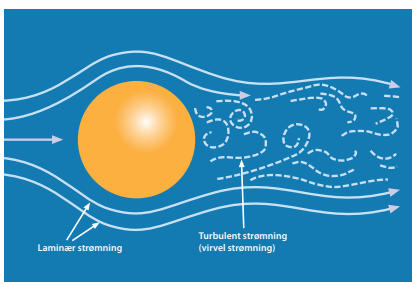
Strømlinjer og hastighetsvektorer

### Strømlinjer

Det er ofte behov for å illustrere hvordan en strømning forløper rundt et legeme i en væskestrøm, for eksempel, et skipsskrog. Dette kan gjøres ved hjelp av såkalte strømlinjer. En strømlinje er en linje som vi tenker oss at en partikkel vil følge, se figur. Hastighetsvektoren er alltid tangentiell til strømlinjen som partikkelen følger. Strømlinjer tegnes gjerne opp slik at det er en konstant mengde væske som til enhver tid strømmer mellom to strømlinjer ved siden av hverandre.

### Strømningsformer

Strømningen rundt et legeme som beveger seg i en væske, kan bli av to helt forskjellige former. **Laminær strømning** kjennetegnes ved at væskepartiklene beveger seg i velordnede sjikt ved siden av hverandre, se figur. **Turbulent strømning** fremgår av figuren. Et slikt strømningsbilde kan vi også kalle virvelstrømning.



Strømningsformer for ei kule i vann

### Bernoullis ligning

Bernoullis ligning er viktig både når vi skal forklare for eksempel hvorfor det dannes bølger rundt skip og hvordan hydrofoiler og propeller virker.

For partikler som beveger seg langs en strømlinje, vil både hastighet ( $v$ ), høydebeliggenhet i tyngdefeltet ( $z$ ) og statisk trykk ( $p$ ) kunne forandres. Bernoullis ligning tar utgangspunkt i at summen av tilhørende energiformer er konstant. Ser vi på en partikkelsamling med masse  $\Delta m$  og volum  $\Delta V$  som beveger seg langs strømlinjen, kan vi derfor skrive:

$$\text{Kinetisk energi} + \text{potensiell energi} + \text{trykkenergi} = \text{konstant}$$

$$\frac{1}{2} \cdot \Delta m \cdot v^2 + \Delta m \cdot g \cdot z + p \cdot \Delta V = \text{konstant}$$

Både leddene for kinetisk og potensiell energi er vel kjent fra Fysikk 1, kapitlet om arbeid og energi. Når det gjelder begrepet trykkenergi, vises til Fysikk 1, kapittel om termofysikk. Her er påvist at den energi som skal til for å presse et volum  $\Delta V$  inn i et rom som står under trykk  $p$ , nettopp er  $p \cdot \Delta V$ . (endelig formulering må sammenholdes med lærebøkene). Ved å dividere alle ledd med  $\Delta V$ , får vi følgende, vanlige form på Bernoullis ligning:

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot z + p = \text{konstant}$$

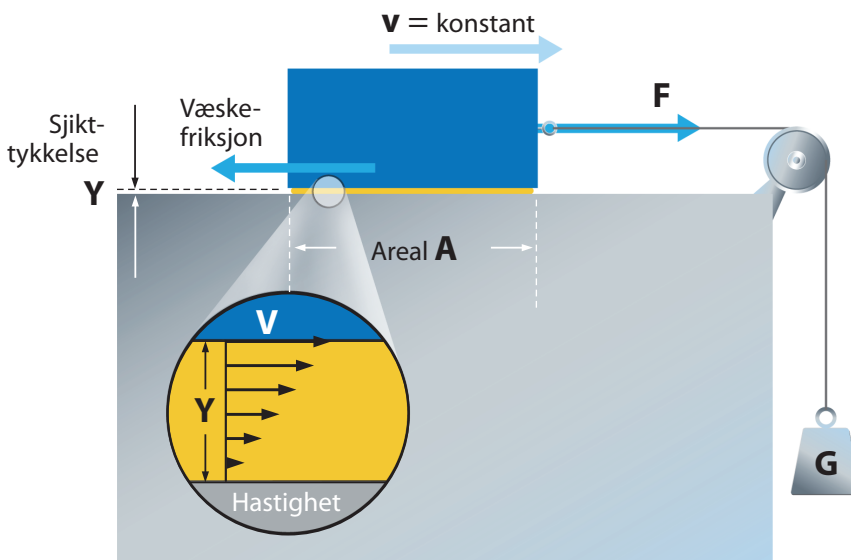
Alle ledd vil nå ha *trykk* ( $N/m^2$ ) som måleenhet. Det første leddet kalles dynamisk trykk og det siste leddet statisk trykk. Ligningen gjelder for en stasjonær strømning uten indre friksjon.



## Viskositet

**Væskers seighet.** Viskositet sier noe om en væskes seighet, det vil si hvor stor indre friksjon det er i væsken. Slik indre friksjon medfører at et legeme som slepes med en gitt hastighet gjennom væsker med ulik viskositet, vil møte ulik friksjon. For eksempel vil motstanden som legemet får i sirup være vesentlig større enn det møter i vann. Sirup har en mye større viskositet enn vann.

Seigheten i væsker kommer av kohesjonskreftene mellom molekylene. Disse avtar ved økende temperatur og dermed avtar også viskositeten.



### Aktuelle data for vann, gjeldende ved 15°C

Viskositet for ferskvann:  
 $\mu = 1,135 \cdot 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$

Saltvann:  
 $\mu = 1,218 \cdot 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$

Ferskvann:  $\rho = 999 \text{ kg}/\text{m}^3$   
 Saltvann:  $\rho = 1025 \text{ kg}/\text{m}^3$

*Prinsipiell metode for bestemmelse av viskositet i meget seige væsker (for eksempel olje og sirup). For vann og andre væsker med liten seighet brukes i stedet såkalte viskosimetre, her måles tiden som ei kule bruker på å falle en bestemt lengde i et vertikalt glassrør fylt med den aktuelle væsken. Glassrøret har en diameter som bare er litt større enn diameteren på kula. Dermed oppstår friksjonen i et meget tynt væskesjikt, noe som jo også var utgangspunktet i den viste figuren.*

**Bestemmelse av væskers seighet.** I prinsippet kan væskers seighet bestemmes som vist i figur. Et legeme er skilt fullstendig fra underlaget ved et tynt skikt av den væsken som skal undersøkes. Et lødd har en tyngde G som er valgt slik at det gir en konstant hastighet på det glidende legemet. Dermed vil tyngden G gi et snordrag F som svarer til friksjonen som oppstår på grunn av væskens viskositet. På grunn av adhesjonskrefter mellom væskens molekyler og flatene på begge sider av væskeskiktet, vil molekylene nærmest underlaget holde seg i ro, mens molekylene nærmest legemet beveger seg med samme hastighet som dette. Vi forutsetter at sjiktet er så tynt at hastighetsprofilen blir lineær, se forstørret figur.

Gjør vi forsøk med ulike tykkelser og arealer på væskesjiktet, vil vi finne at friksjonen er proporsjonal med arealet (A) og hastighetsgradienten (v/y). Proporsjonalitetskonstanten kaller vi væskens absolutte viskositet eller bare viskositet, og vi symboliserer den med  $\mu$ . Vi skjønner at denne konstanten må ha enheten

$$\text{Viskositet } \mu = \frac{F}{A \cdot \frac{v}{y}} \left[ \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} = \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right]$$



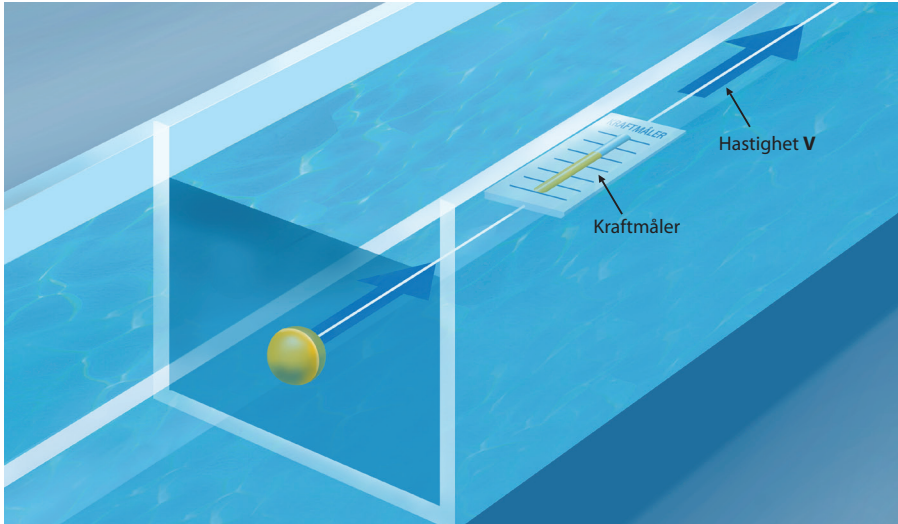
### Undringsoppgave:

Hva er forskjellen på hydrodynamikk og hydrostatikk?



# Grunnleggende strømningsslære

## Friksjonsmotstand for neddykket kule



Det vises til figur, hvor vi har ei kule som dras med en konstant hastighet på så dypt vann at det ikke danner seg bølger på overflaten. Kula har samme midlere tetthet som vann. Vi er interessert i å finne den friksjonsmotstand  $F$  som kula møter under bevegelsen og hva det er som bestemmer denne motstanden. Friksjonsmotstanden er lik snordraget, som måles ved hjelp av en kraftmåler.

Måling av friksjonsmotstand ved forskjellige hastigheter for ei neddykket kule.

### Dimensjonsanalyse og dimensjonsløse grupper.

Vi kan tenke oss at det er fire, fysiske størrelser som bestemmer den femte størrelsen, friksjonsmotstanden  $F_f$

Kulas diameter,  $D$  (m)

Kulas hastighet,  $v$  (m/s)

Vannets tetthet,  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>)

Vannets viskositet (seighet),  $\mu$  (kg/(m\*s), se siden foran

Vi ønsker å kartlegge den virkning som disse fire størrelsene har på friksjonsmotstanden  $F_f$ . To av størrelsene, vannets tetthet og viskositet, synker litt med temperaturen, men dette er så lite at vi i praksis kan betrakte dem som konstante størrelser. Dermed er det først og fremst virkningen av varierende diameter  $D$  og varierende strømningshastighet som må undersøkes eksperimentelt. For å få full oversikt kunne vi da gjøre f. eks. 10 forsøk med ulike strømningshastigheter og samme kule. Så kunne vi gjenta forsøksserien med ni andre kulediametere. Alt dette ville i så fall krevd totalt 100 forsøk og 10 grafer for presentasjon av resultatene. Det er imidlertid mulig å gå fram på en "lurere" måte. Vi kan nemlig samle to eller flere størrelser i dimensjonsløse grupper.

Det viktig at gruppene er dimensjonsløse. Med det mener vi at alle størrelsene skal inngår som faktorer eller divisorer på en måte som medfører at grunnenhetene kan forkortes bort, se nedenfor.

I vårt aktuelle problem kan dette gjøres ved å opprette følgende to dimensjonsløse grupper:

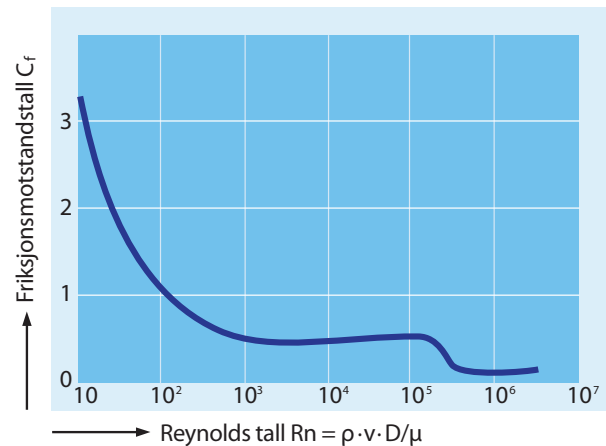
$$\text{Gruppe 1} = \frac{R_f}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2} \left[ \frac{\text{kg} \cdot \text{m/s}^2}{(\text{kg/m}^3) \cdot (\text{m/s})^2 \cdot \text{m}^2} = 1 \right]$$

$$\text{Gruppe 2} = \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\mu} \left[ \frac{(\text{m/s}) \cdot \text{m} \cdot (\text{kg/m}^3)}{\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})} = 1 \right]$$

## Friksjonsmotstandstall og Reynolds tall

Det er vanlig å kalle den første gruppen for friksjonsmotstandstall og symbolisere den med  $C_f$ . Den andre dimensjonsløse gruppen kaller vi Reynolds tall og symboliserer den med  $Rn$  (engelsk: Reynolds number). Siden gruppene er dimensjonsløse, kommer de altså ut som rene tallverdier. Nå blir det tilstrekkelig å gjennomføre *en eneste forsøksserie* med forskjellige Reynolds tall (som kan varieres ved f. eks. å variere strømningshastigheten), beregne friksjonsmotstandstallet etter formelen for gruppe 1 ovenfor og fremstille resultatene som vist i figur. Totalt blir det nå altså tilstrekkelig med ca 10 forsøk. Likevel gir denne *ene grafen* nå *full oversikt* over hele problemkomplekset som knytter seg til motstanden for ei kule som beveger seg i et medium, enten det dreier seg om ei stor eller liten kule, som beveger seg i vann eller sirup, og med liten eller stor hastighet.

Når vi i gruppe 1 har tatt med brøken  $1/2$ , er det for å kunne basere friksjonsmotstandstallet til den størrelsen som i Bernoullis ligning er kalt dynamisk trykk. Når det gjelder brøken  $(\pi/4)$ , er denne tilsvarende tatt med fordi det for "fyldige" legemer er mest naturlig at friksjonsmotstandstallet baseres på det arealet som er projisert i strømningsretningen (altså i dette tilfellet arealet av en sirkel).



*Friksjonsmotstandstall som funksjon av Reynolds tall for kule som beveger seg på dypt vann (uten bølgedannelse på overflaten). Motstandstallet er basert på projisert areal*

**Resonnementene ovenfor er meget viktige i hydrodynamikken. De leder fram til følgende ligning for bestemmelse av friksjonsmotstanden på kuler som beveger seg i vann**

$$R_f = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot C_f$$

**Friksjonsmotstandstallet  $C_f$  i ligningen finnes av den viste grafen, etter først å ha beregnet Reynolds tall**

$$Rn = \rho \cdot v \cdot D / \mu$$

**for strømningssituasjonen.**



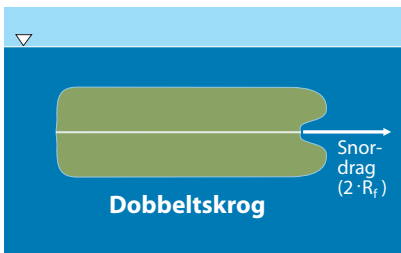
### Undringsoppgave:

Hva er Reynoldstallet, friksjonsmotstandstallet og friksjonsmotstanden for ei kuleformet dykkerklokke med diameter 2 m som slepes neddykket i ferskvann med hastigheten 0,6 m/s.

**To hovedtyper motstand: Friksjonsmotstand og bølgemotstand**  
Beveger et legeme seg på *overflaten* av en væske i stedet for neddykket i væsken, vil det dannes bølger. Vi vet at bølger egentlig er forplantning av energi. Denne energien må hentes fra legemet selv, som dermed vil merke en ekstra motstand i tillegg til friksjonsmotstanden. Denne motstanden kaller vil bølgemotstand. Vi skal i det etterfølgende studere nærmere både friksjonsmotstanden og bølgemotstanden for skip.



# Friksjons- og bølgemotstand for skip



Bestemmelse av totalmotstand ( $R_{tot}$ ), friksjonsmotstand ( $2 \cdot R_f$ ) og bølgemotstand ( $R_W = R_{tot} - R_f$ ) for en skipsmodell

## Måling av friksjonsmotstand og bølgemotstand

Vi kan måle motstandene ved å bruke skipsmodeller som vist på figuren. Dette kan gjøres ved først å måle motstanden når skipsmodellen slepes med en dypgang som svarer til den som fullskalaskipet normalt vil gå med. Denne totalmotstanden omfatter nå både bølgemotstanden og friksjonsmotstanden for den delen av skroget som befinner seg under vann. Deretter kan vi måle friksjonsmotstanden alene ved å lage en "dobbelmodell" (se figur) som slepes på så dypt vann at det ikke dannes bølger under bevegelsen. Friksjonsmotstanden for den modellen som ble slept i vannflata, vil nå bli lik halvparten av "dobbelmodellens" motstand. Når denne halvparten så subtraheres fra totalmotstanden, har vi fått bestemt også bølgemotstanden.

## Friksjonsmotstand for deplasementsskip

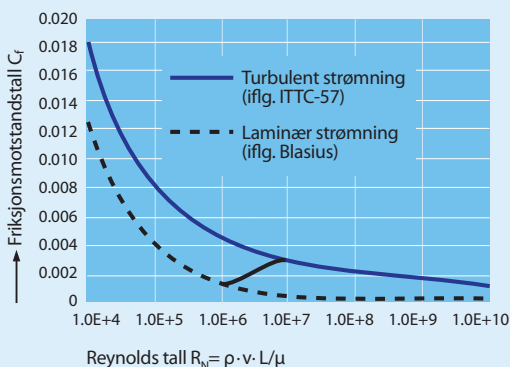
Vi bruker samme resonnementer som foran for kula. Det projiserte arealet ( $\pi \cdot D^2/4$ ) og "lengdedimensjonen" av kula ( $D$ ) må imidlertid for "slanke" legemer erstattes av henholdsvis skrogets "våte" overflate ( $S$ ) og lengde ( $L$ ), som regel brukes her lengde i vannlinjen). Dermed definerer vi for skip:

$$\text{Friksjonsmotstandstall } C_f = \frac{R_f}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S}$$

$$\text{Reynolds tall } R_n = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu}$$

Måler vi friksjonsmotstanden  $R_f$  ved forskjellige hastigheter (og beregner tilhørende Reynolds tall), framkommer friksjonsmotstandstall som vist i graf i figur til venstre. Slike forsøk har vært gjort for en rekke ulike deplasementsskip og en middelvei av disse kan med god tilnærming beskrives ved hjelp av følgende erfaringsformel (fra ITTC):

$$\text{Friksjonsmotstandstall } C_f = \frac{0,075}{(\log R_n - 2)^2}$$



Friksjonsmotstandstall for strømning forbi skipsskrog som funksjon av Reynolds tall. Strømningen går over fra laminær til turbulent (sml. figur på side 3-6) i området  $R_n = 10^6 - 10^7$ .

## Bølgemotstand for deplasementsskip. Froudes tall

Bølgemotstand kommer av at et skip i bevegelse danner bølger på vannoverflaten. Bølgeenergien hentes fra skipet selv, som dermed merker en ekstra motstand i tillegg til friksjonsmotstanden.

Det vil nå være andre størrelser som er med på å bestemme bølgemotstanden enn de som friksjonsmotstanden var avhengig av. Vannets viskositet spiller ikke noen rolle for bølgedannelse. Det gjør derimot tyngdeakselerasjonen, som dermed må tas inn som en ny størrelse av betydning. Dermed kan vi tenke oss at bølgemotstand omfatter følgende størrelser som på en eller annen måte innvirker på problemkomplekset:

- Bølgemotstand,  $R_b$  ( $N = \text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$ )
- Karakteristisk lengde av modellen,  $L$  (m)
- Modellens "våte" overflate,  $S$  ( $\text{m}^2$ )
- Modellens hastighet,  $v$  (m/s)
- Vannets tetthet,  $\rho$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
- Tyngdeakselerasjonen,  $g$  ( $\text{m}/\text{s}^2$ )

Som tidligere undersøker vi nå hvordan vi kan samle størrelsene i grupper slik at disse blir *dimensjonsløse*, samtidig som alle blir tatt med minst en gang. Vi finner:

$$\text{Gruppe 1} = \frac{R_b}{\frac{1}{2} \rho v^2 \cdot S} \left( \frac{\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2}{(\text{kg}/\text{m}^3) \cdot (\text{m}/\text{s})^2 \cdot \text{m}^2} = 1 \right)$$

$$\text{Gruppe 2} = \frac{v}{\sqrt{g \cdot L}} \left( \frac{\text{m}/\text{s}}{\sqrt{(\text{m}/\text{s}^2) \cdot \text{m}}} = 1 \right)$$

Det er vanlig å kalle den første gruppen for bølgemotstandstallet og symbolisere den med  $C_w$  (engelsk: wave coefficient). Den andre gruppen kaller vi Froudes tall,  $F_n$ . Ved å gjennomføre forsøk ved diverse hastigheter som beskrevet foran, kan det fastlegges en graf for et skips bølgemotstandstall som funksjon av Froudes tall. Denne har form som vist i figur. Tallfesting av en typisk graf framgår neste side.

**Bølgedannelse ved deplasementsskip.**

Bølgedannelsen rundt skip i fart er komplisert, og vi har bare plass til en meget kortfattet forklaring. Ved skipets baug vil det "hope seg opp" vann, mens det normalt oppstår en nivåsenkning ved akterenden. Baugen og akterenden vil sette opp hvert sitt bølgesystem med spredbølger og tverrbølger, se figur. Bølgesystemene vil interferere, og ved bestemte skipshastigheter framkommer det som i fysikk 1 er kalt konstruktive og destruktive interferenser. Ved konstruktiv interferens vil bølgene ha ekstra mye energi, noe som må bety en større bølgemotstand enn forventet. Dette gjenspeiler seg som en rødfarget "hump" ved  $N=1$  på grafen for bølgemotstandstallet. Tilsvarende gir en situasjon med destruktiv interferens ved akterenden en "dump" i grafen som vist ved  $N=2$ . Det samme gjentar seg ved  $N=3$  og  $N=4$ .

**Sammendrag**

Bølgemotstanden for et skip beskrives ved hjelp av ligningen:

$$R_w = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot S \cdot C_w(N)$$

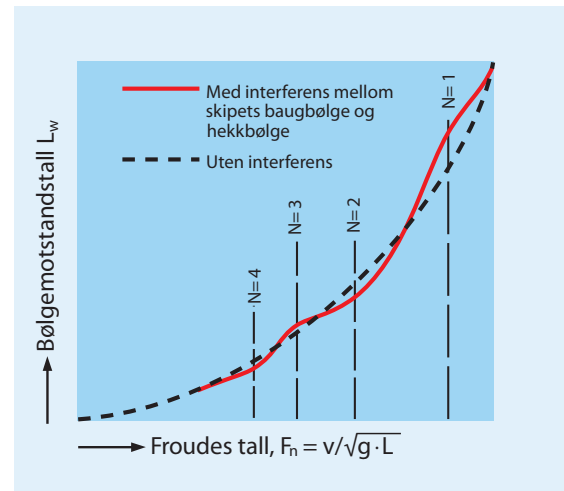
Bølgemotstanden øker altså kraftig med hastigheten, både fordi denne kvadreres og fordi bølgemotstandstallet øker med Froudes tall. Dette tallet baseres gjerne på skipets lengde i vannlinjen  $L_{vl}$  og defineres slik:

$$F_n = \frac{v}{\sqrt{g \cdot L_{vl}}}$$

Når det gjelder friksjonsmotstanden, kan denne beskrives av en tilsvarende ligning:

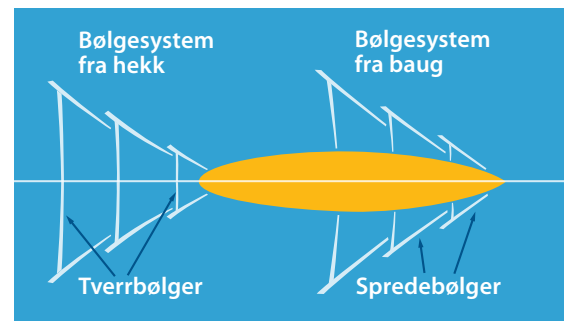
$$R_f = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \cdot C_f(N)$$

Friksjonsmotstandstallet  $C_f$  kan enten beregnes av erfaringsformelen på forrige side eller tas ut av grafene ovenfor, som er gitt som funksjoner av Reynolds tall og Froudes tall. Vi skjønner av disse grafene at friksjonsmotstanden har størst betydning ved lave hastigheter. Selv om friksjonsmotstandstallet synker svakt med hastigheten, vil selve friksjonen ( $F_f$ ) øke relativt kraftig med hastigheten, siden denne skal kvadreres i ligningen for  $F_f$ .



**Typisk graf for bølgemotstandstall ( $C_w$ ) som funksjon av Froudes tall ( $F_n$ ) for et deplasementsskip. Eksempel på interferens mellom vannbølger som beskrevet i fysikken.**

Uregelmessighetene skriver seg fra interferens mellom skipets bølgesystemer.



**Bølgedannelse fra skip i fart**



# Motstandstall for deplasementskip. Overslagsberegning av totalmotstanden

Vi har foran sett at et skip vil møte både friksjonsmotstand og bølgemotstand når det er i fart. Det er imidlertid også andre typer motstander som opptrer, men de som er nevnt, er klart de to største.

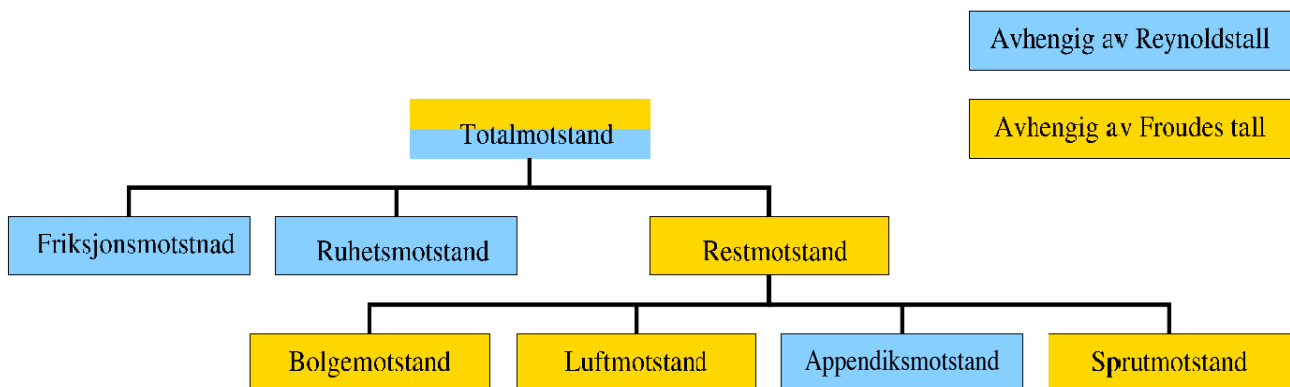
## Totalmotstand for skip

Figuren nedenfor gir en komplett oversikt over alle komponenter som et skips totalmotstand omfatter. Her framgår også om det er Reynolds tall eller Froudes tall som de enkelte komponentene er avhengige av.

Når det gjelder friksjonsmotstanden, ser vi av figuren at det kommer en såkalt ruhetsmotstand i tillegg til den motstanden vi har behandlet hittil. Ruhetsmotstanden forårsakes av ujevnheter i skroget. Disse kan skyldes selve framstillingen, men senere skader i maling, rust og begroing spiller også inn. En slik ruhetsmotstand vil ikke opptre under modellprøving og må adderes separat, basert på erfaringsverdier. Selv om ruhetsmotstanden er av betydning i praktisk drift av et skip, behandler vi ikke denne nærmere her.

Når det gjelder bølgemotstanden, ser vi videre at det er vanlig å legge denne inn i en "samle post" som vi kaller restmotstand, og som omfatter følgende tillegg til den vanlige bølgemotstanden:

- *Luftmotstand* på alle arealer over vannflaten. Denne forårsakes både av friksjon fra lufta som strømmer forbi skrog og overbygning og den ujevne trykkfordeling som denne strømmingen gir (større trykk på frontarealer enn på bakre arealer).
- *Appendiksmotstand* fra utvendig tilleggsutstyr på skipsskroget, som for eksempel rorbraketter, stabilisatorer og slingrekjøler.
- *Sprutmotstand*. Som for bølger, inneholder sprut energi som må hentes fra skipet selv

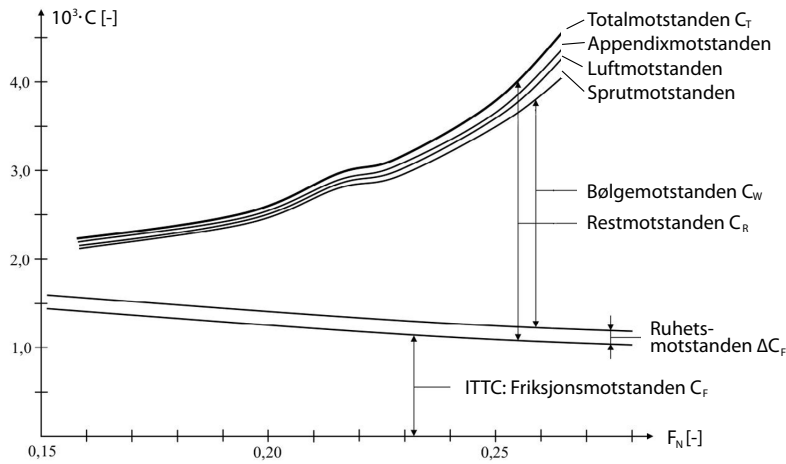


### Oppdeling av et skips totalmotstand i komponenter

Som vi ser av figur på neste side, bidrar de nevnte tilleggene ikke noe vesentlig til totalmotstanden. Vi kan ikke gå for mye i detalj i denne boka og samler alle motstandene som er avhengige av Froudes tall. Siden det er et skips bølgedannelse som er det klart største bidraget til disse "Froude-avhengige" komponentene, vil vi av pedagogiske grunner heretter kalle restmotstanden for bølgemotstand.

## Motstandstall som funksjon av hastighet

Alle motstandstallene er framstilt grafisk i figur nedenfor. Her er Froudes tall brukt som fri variabel. Som vi nå vet, er imidlertid dette tallet proporsjonalt med hastigheten og for et gitt skip kan derfor figuren suppleres med en egen akse med hastigheten som fri variabel.



Typiske motstandstall for totalmotstand og de enkelte motstandskomponenter for deplasementskip (middelverdi av flere skip)

## Grov overslagsberegning av et skips totale motstand

Slike overslagsberegninger kan enkelt gjøres ved å sette inn verdier for totalmotstandstallet ( $C_{tot}$ ) fra grafen ovenfor i ligningen

$$R_{tot} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \cdot C_{tot} \text{ (N)}$$

**Eksempel.** Bruk grafen for totalmotstandstallet i figuren ovenfor til å gjøre en "grov" overslagsberegning av totalmotstanden i saltvann ved 15 og 18 knop for et skip med volumdeplasement  $\nabla = 100000 \text{ m}^3$  og en lengde  $L_{vl} = 240 \text{ m}$ . Våt overflate er tilnærmet beregnet til  $S = 14 \cdot 10^3 \text{ m}^2$ , se oppgave 3. 9.

$$\text{Hastighet : } v = 15 \text{ knop} = 15 \frac{\text{n.mil}}{\text{h}} \cdot 1852 \frac{\text{m}}{\text{n.mil}} / 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} = 7,72 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{Hastighet i m/s ved 18 knop } v = 7.72 \text{ m/s} \cdot 18/15 = 9,26 \text{ m/s}$$

$$\text{Froudes tall, 15 knop: } F_n = \frac{7,72 \text{ m/s}}{\sqrt{9,8 \text{ m/s}^3 \cdot 240 \text{ m}}} = 0,159$$

$$\text{Froudes tall, 18 knop: } F_n = 0,159 \cdot 18/15 = 0,191$$

$$\text{Totalmotstandstall ved 15 knop, fra graf: } C_{tot} = 2,25 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{Totalmotstandstall ved 18 knop, fra graf: } C_{tot} = 2,47 \cdot 10^{-3}$$

Totalmotstand ved 15 knop:

$$R_{tot} = \frac{1}{2} \cdot 1025 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (7,72 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 \cdot 14 \cdot 10^3 \text{ m}^2 \cdot 2,25 \cdot 10^{-3} = 962 \text{ kN}$$

Totalmotstand ved 18 knop:

$$R_{tot} = \frac{1}{2} \cdot 1025 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (9,26 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 \cdot 14 \cdot 10^3 \text{ m}^2 \cdot 2,47 \cdot 10^{-3} = 1520 \text{ kN}$$

I en grov overslagsberegning er det nok å oppgi svarene med gjeldende siffer.



### Undringsoppgave:

Grafene på figuren ovenfor gjelder for et deplasementskip. Hvilken virkning tror du overgang til planende båt vil ha på grafene for friksjonsmotstanden og bølgemotstanden? Hva skjer ved overgang til hydrofoillbåt?

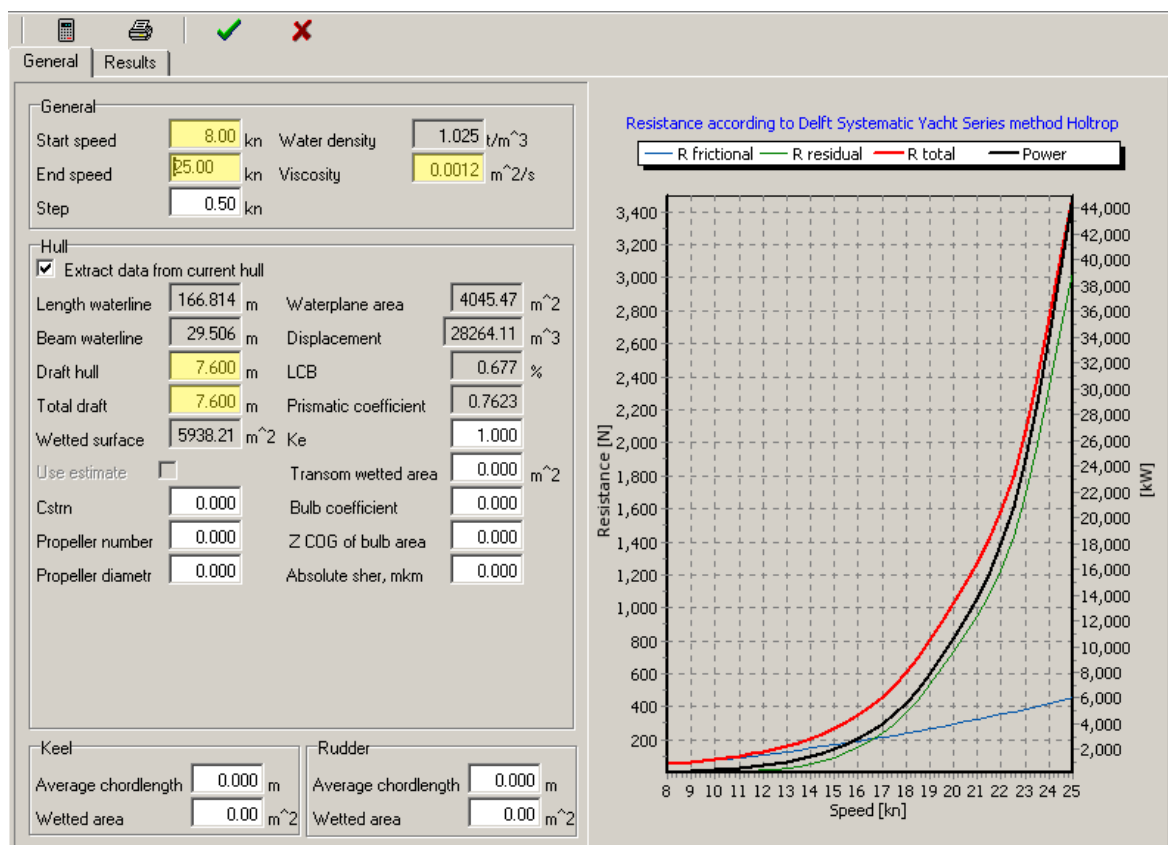


# Beregning av motstand og netto effektbehov for deplasementsskip ved hjelp av dataprogram.

Det finnes tilgjengelige dataprogrammer som gjør det mulig å gjøre nøyaktigere beregninger av motstanden for et nytt skip enn de overslagsberegninger som er vist foran. Slike dataprogrammer tar hensyn til detaljer i skrogformen i større grad enn det er gjort i figuren på forrige side, hvor grafen for totalmotstandstallet bare er å betrakte som en gjennomsnitt for typiske deplasementsskip. Slike dataprogrammer bergner dessuten skipets våte overflate vesentlig nøyaktigere enn den metode som lå til grunn i eksemlet foran.

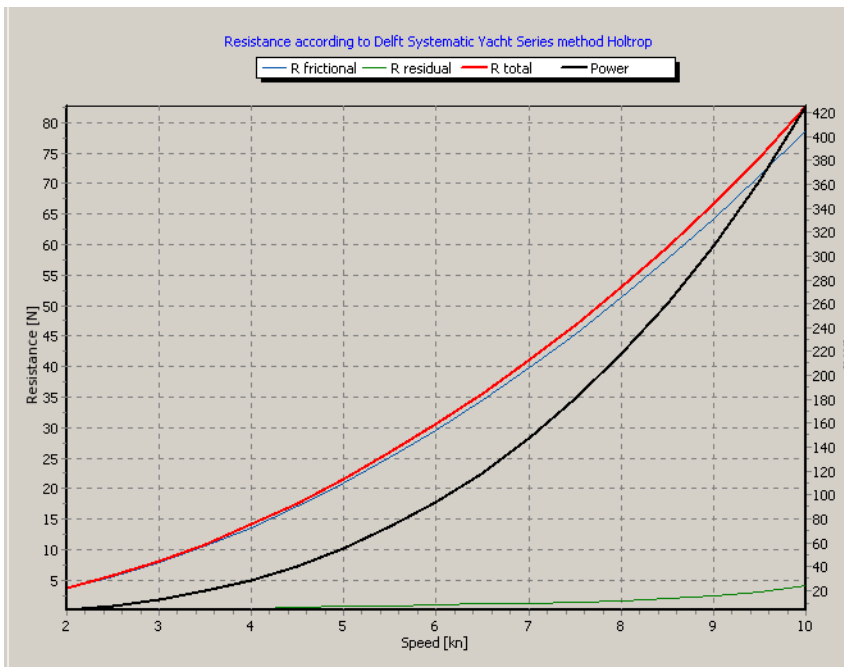
## Beregning av motstand ved hjelp av dataprogram

Figuren nedenfor viser resultater fra motstandsberegninger av et deplasementsskip basert på dataprogrammet Freeship (demoskip 5). Dette arbeider etter såkalt Holtrops metode, som er basert på en stor samling av empiriske data for en rekke eksisterende skip. Holtrops metode gjør det mulig å få fram et godt estimat av et *konvensjonelt* skips motstand uten å gjøre modellforsøk. De gule feltene indikerer data som brukeren må legge inn i programmet for det aktuelle skipet. Programmet kan også brukes til en rekke andre beregninger. Det vises i denne forbindelse til en brukermanual i prosjekthåndboka "Den unge skipsdesigneren".



Vi ser av figuren at også denne metoden deler opp totalmotstanden (rød graf) i en friksjonsmotstand (blå graf) og en restmotstand (R residual, grønn graf). Som nevnt foran, består restmotstanden i det alt vesentlige av bølgeomotstand. For øvrig har grafene (som kommer ut med enheten kN direkte) de samme to karakteristiske trekk som ble påpekt også foran i forbindelse med grafene for motstandstallene som funksjon av Froudes tall:

- Grafen for restmotstanden (bølgeomotstanden) har en svak "hump" ved ca 20 knop, og denne resulterer selvsagt i et tilsvarende forløp i grafen for totalmotstanden. Årsaken til dette fenomenet er forklart foran.
- Ved store hastigheter er det restmotstanden (bølgeomotstanden) som dominerer. Ved små hastigheter er det imidlertid friksjonsmotstanden som er størst. Dette ser vi tydeligst i det utsnittet i større skala som er vist på nytt nedenfor.



**Beregning v.h.j.a. Freeship av motstander og effektbehov for det samme skipet som foran, ved små hastigheter.**

Ved disse hastighetene er friksjonsmotstanden dominerende (blå graf).



## Beregning av motstandseffekt (slepeffekt)

Som det framgår av det viste skjermbildet, beregner dataprogrammet også den effekt som svarer til totalmotstanden (sort graf, med akse i kW til høyre). Disse beregningene baserer seg selvsagt på den grunnleggende sammenheng mellom arbeid og effekt som er behandlet i Fysikk 1. Er totalmotstanden  $F_{\text{tot}}$  (kN) ved en hastighet  $v$  (m/s), vil det effektbehovet som svarer til totalmotstanden bli

$$P_{\text{tot}} = R_{\text{tot}} \cdot v$$

Dette effektbehovet kan vi kalle motstandseffekten eller slepeffekten. Dette er den netto effekt som skal til for å slepe skipet (uten propell) ved hastigheten  $v$ . Den må ikke forveksles med den effekt som er nødvendig når skipet går med egen maskin. Propellen har nemlig en virkningsgrad ( $\eta_p$ ), som resulterer i et vesentlig større effektbehov ( $P_{\text{tot}}/\eta_p$ ). Dette kommer vi tilbake til senere.

## Undringsoppgave:

Det vises til grafen for effekt foran. Omtrent hvor stor er den midlere eksponenten for en slik effektgraf mellom hastighetene 12 og 20 knop? Hvordan kan vi da skrive effektbehovet som funksjon av hastigheten, slik at vi enkelt kan gjøre overslagsberegninger av effektbehovet for et gitt skip ved ulike hastigheter uten å bruke dataprogrammet?

# Modellforsøk for deplasementsskip. Skalering

Vi har flere ganger tidligere påpekt at det er modellforsøk som gir de nøyaktigste bestemmelsene av totalmotstanden for et planlagt skip. Vi skal her gi en oversikt over hvordan man da går fram.

## Modellforsøk i slepetanker

Kommersielle modellforsøk utføres i såkalte slepetanker, som normalt er 200-300 m lange og 10-12 m brede. Modellens skrog må selvsagt lages som en nøyaktig kopi av det planlagte skipet og ha riktig dypgang. Modellen festes til en slepevogn som drar den med seg med en konstant hastighet, samtidig som slepekraften måles. Hastigheten er normalt 1-8 m/s. Det er viktig at modellen ikke blir for liten. Typiske lengder er 2-8 m og vanlige skalaer som brukes er 1:100, 1:50 eller 1:25. Dette skriver vi gjerne slik:  $\lambda = 100, 50$  eller  $25$ .

Som nevnt foran, er friksjonsmotstanden avhengig av Reynolds tall, mens bølgeomotstanden er avhengig av Froudes tall. Det er ikke mulig å gjøre forsøk hvor både Reynolds tall og Froudes tall er riktige samtidig. Siden det dessuten er slik at den tidligere omtalte erfaringsformelen for friksjonsmotstandstall anses som pålitelig, *beregnes* dette istedenfor å bli fastlagt eksperimentelt. Bølgeomotstandstallet er mye vanskeligere å beregne og det er bestemmelse av dette tallet som er den primære hensikt med å gjennomføre modellforsøk.

Dermed blir det en sentral betingelse at modellforsøkene må utføres med samme *Froudes tall* som det virkelige skipet vil ha under drift. Basert på definisjonen av Froudes tall, modellens målestokk  $\lambda$  og innføring indekser "m" for modellen og "s" for fullskalaskipet, kan vi sette opp følgende krav til sammenhengende hastigheter :

Froudes tall for modell = Froudes tall for fullskalaskip

$$\frac{v_m}{\sqrt{g \cdot L_{v,m}}} = \frac{v_s}{\sqrt{g \cdot L_{v,s}}}$$

$$v_m = \frac{v_s}{\sqrt{\lambda}}$$

Dersom en modell i skala 1:100 slepes med en hastighet for eksempel lik 2 knop (ca 1 m/s), vil dette svare til en hastighet lik 20 knop på det virkelige skipet.



## Overføring av måleresultater fra modell til fullskala

Som eksempel skal vi nedenfor gå gjennom prosedyre og resultater for et modellforsøk i skala 1:50 for et deplasementsskip som er designet med følgende data:

Volumdeplasement :  $\nabla = 100000 \text{ m}^3$

Våt overflate:  $S_s = 13 \cdot 10^3 \text{ m}^2$

Lengde i vannlinje:  $L_{vl,s} = 240 \text{ m}$

Normal hastighet:  $v_s = 18 \text{ knop} = 9,26 \text{ m/s}$



### Undringsoppgave:

Hvorfor er det så viktig at en modell av et skip ikke er for liten hvis den skal brukes til å bestemme totalmotstanden for fullskalaskipet? Finnes det noen naturlig grense for hvor liten modellen kan være? Hint: studer grafene på side 3-10.

	Prosedyre	Talleksempel
Modell	<b>1 Målt hastighet:</b> $v_m \text{ (m/s)}$	$v_m = 1,31 \text{ m/s}$
	<b>2 Målt totalmotstand</b> $R_{tot,m} \text{ (N)}$	$R_{tot,m} = 19,1 \text{ N}$
	<b>3 Lengde i vannlinje</b> $L_{vl,m} = \frac{L_{vl,s}}{\lambda}$	$L_{vl,m} = \frac{240 \text{ m}}{50} = 4,8 \text{ m}$
	<b>4 Våt overflate</b> $S_m = \frac{S_s}{\lambda^2}$	$S_m = \frac{13 \cdot 10^3 \text{ m}^2}{50^2} = 5,2 \text{ m}^2$
	<b>5 Totalmotstandstill</b> $C_{tot,m} = \frac{R_{tot,m}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2 \cdot S_m}$	$C_{tot,m} = \frac{19,1 \text{ N}}{\frac{1}{2} \cdot (1,0 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3) \cdot (1,31 \text{ m/s})^2 \cdot 5,2 \text{ m}^2} = 4,29 \cdot 10^{-3}$
	<b>6 Reynolds tall</b> $R_{n,m} = \frac{\rho \cdot v_m \cdot L_{vl,m}}{\mu}$	$R_{n,m} = \frac{(1,0 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3) \cdot (1,31 \text{ m/s}) \cdot 4,8 \text{ m}}{1,135 \cdot 10^{-3} \text{ kg/(m·s)}} = 5,54 \cdot 10^6$
	<b>7 Friksjonsmotstandstill</b> $C_{f,m} = \frac{0,075}{(\log R_{n,m} - 2)^2}$	$C_{f,m} = \frac{0,075}{(\log(5,54 \cdot 10^6) - 2)^2} = 3,26 \cdot 10^{-3}$
	<b>8 Bølgemotstandstill</b> $C_{w,m} = C_{tot,m} - C_{f,m}$	$C_{w,m} = 4,29 \cdot 10^{-3} - 3,26 \cdot 10^{-3} = 1,03 \cdot 10^{-3}$
Fullskala skip	<b>9 Hastighet</b> $v_s = v_m \cdot \sqrt{\lambda}$	$v_s = 1,31 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \sqrt{50} = 9,26 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
	<b>10 Bølgemotstandstill</b> $C_{w,s} = C_{w,m}$	$C_{w,s} = 1,03 \cdot 10^{-3}$
	<b>11 Reynolds tall</b> $R_{n,s} = \frac{\rho \cdot v_s \cdot L_{vl,s}}{\mu}$	$R_{n,s} = \frac{(1,025 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3) \cdot (9,26 \text{ m/s}) \cdot 240 \text{ m}}{1,218 \cdot 10^{-3} \text{ kg/(m·s)}} = 1,87 \cdot 10^9$
	<b>12 Friksjonsmotstandstill</b> $C_{f,s} = \frac{0,075}{(\log R_{n,s} - 2)^2}$	$C_{f,s} = \frac{0,075}{(\log(1,87 \cdot 10^9) - 2)^2} = 1,42 \cdot 10^{-3}$
	<b>13 Totalmotstandstill</b> $C_{tot,s} = C_{f,s} + C_{w,s}$	$C_{tot,s} = 1,42 \cdot 10^{-3} + 1,03 \cdot 10^{-3} = 2,45 \cdot 10^{-3}$
	<b>14 Totalmotstand</b> $R_{tot,s} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_s^2 \cdot S_s \cdot C_{tot,s}$	$R_{tot,s} = \frac{1}{2} \cdot (1,025 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3) \cdot (9,26 \text{ m/s})^2 \cdot 13 \cdot 10^3 \text{ m}^2 \cdot 2,45 \cdot 10^{-3} = 1400 \text{ kN}$

# Hurtiggående fartøyer, definisjoner og oversikter

## Hva menes med hurtiggående fartøyer og hva karakteriserer disse?

Hittil har vi sett på fartøyer hvor løftekraften skrives seg fra oppdriften, det vil si fra et hydrostatisk trykk. For *hurtiggående* fartøyer er det viktig at framdriftsmotstanden reduseres. Dette kan oppnås ved at oppdriften i *betydelig grad* erstattes av løftekrefter som genereres av et hydrodynamisk trykk, altså trykk som oppstår på grunn av hastigheten til strømmingen. Dette trykket kan som kjent beregnes av uttrykket  $\frac{1}{2} \rho \cdot v^2$ , se omtalen av Bernoullis ligning på side 3-6: For å utnytte dette dynamiske trykket til å skape *løftekrefter*, bruker man enten spesielle skrogformer/trimminger eller man utstyres kroget med hydrofoiler (bæreplan). En tredje mulighet til å løfte opp et fartøy i vannet uten å bruke oppdrift, er å utforme det med luftputer som settes under overtrykk. Disse metodene er utdypet i tabellen nedenfor.

Det er enklere å utnytte de nevnte virkemidler slik at det "monner" i små og dermed lette fartøyer enn i store. Derfor vil nødvendig hastighet for at et fartøy skal kunne betegnes som hurtiggående, være avhengig av fartøystørrelsen. For fartøyer hvor vanntrykk genererer løftekrefter direkte på skrogene, vil i så fall Froudes tall kunne benyttes som mål for hvor hurtiggående de egentlig er. Froudes tall kombinerer nemlig hastighet og fartøystørrelse på en egnet måte for slike vurderinger. For hydrofoil- og luftputefartøyer er tilsvarende bruk av Froudes tall ikke relevant, men det er ingen tvil om at disse avanserte fartøykonstruksjonene i alle fall er beregnet på å gi hurtiggående fartøyer. Det skjønner vi også av den posisjon slike fartøyer er markert med i diagrammet på neste side.

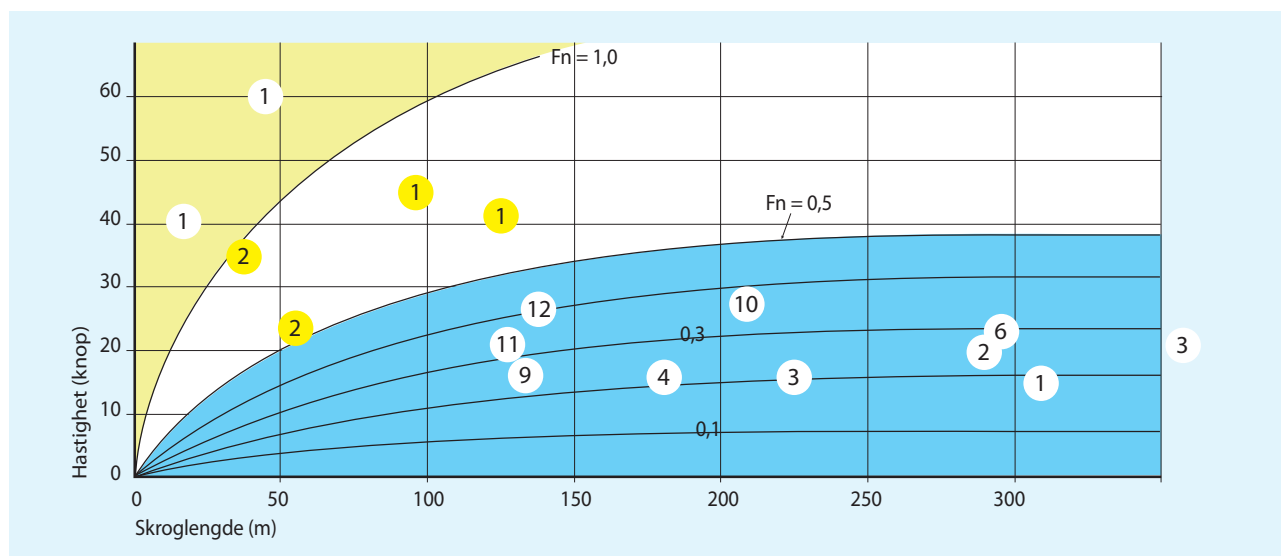
Som nevnt ovenfor, er det viktig å gjøre hurtiggående fartøyer så lette som mulig. Normalt bygges de derfor i lettmetall i stedet for stål.

## Oversikt over hurtiggående fartøyer

Inndeling etter prinsipper for hvordan fartøyene framskaffer nødvendig løftekraft i vannet	Vanntrykk på skrog (ett eller flere)	Konvensjonelle fartøyer	Hurtiggående fartøyer	
		$F_n < 0,4 - 0,5^{*)}$	$0,4 - 0,5 < F_n < 1,0 - 1,2^{*)}$	$F_n > 1,0 - 1,2^{*)}$
		<b>Ⓐ Deplasementfartøyer</b> • <b>Hydrostatisk trykk alene</b> gir v.h.j.a. det fortrenge vannvolumet en oppdrift som er nødvendig for å utbalansere fartøyet tyngde.	<b>Ⓑ Semideplasementsfartøyer</b> • <b>Spesiell skrogform og trim</b> gjør at <b>hydrodynamisk trykk</b> løfter opp fartøyet i <b>betydelig grad</b> . • <b>Hydrostatisk trykk</b> (oppdrift) sørger for resten av løftekraften.	<b>Ⓒ Planende fartøyer</b> • <b>Spesiell skrogform/trim</b> gjør at <b>hydrodynamisk trykk alene</b> løfter fartøyet praktisk talt helt opp av vannet (altså nesten uten hjelp av oppdrift).
	Vanntrykk på foiler	<b>Ⓓ Hydrofoilfartøyer.</b> Fartøyenes skrog (ettskrogs eller katamaranskrog) utstyres med foiler (bæreplan). Disse påvirkes av hydrodynamisk trykk, som praktisk talt alene gir tilstrekkelig kraft til å løfte hovedskrogene fullstendig opp av vannet.		
	Lufttrykk i "pute" under fartøyet	<b>Ⓔ Luftputefartøyer.</b> Vifter tilfører luft til avgrensede rom på fartøyenes undersider. Viktigste type er luftputekatamaraner som kalles SES, se figur A neste side. Ca 80 % av løftekraften kommer fra trykket i luftputa. Det finnes også konstruksjoner som baseres på 100 % lufttrykk (ACV, figur B). En ikke realisert type er WIG (som forutsettes å fly meget nær overflaten, figur C).		

\*) Basert på Odd Faltinsen: "Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles"

Eksempler på hastigheter og skroglengder for utførte hurtiggående fartøyer innen alle hovedtypene er plottet inn i figur nedenfor. Nærmere omtale av hovedtypene B, C og D er gitt på sidene 3/20 – 23. Omtale av hovedtype E begrenses til illustrasjoner nedenfor.



**Hastighet som funksjon av skroglengde for fartøystyper** (A) **Deplasementsfartøyer (konvensjonelle fartøyer):**

- |                   |                  |
|-------------------|------------------|
| 1 Råoljetankskip  | 7 Ro-Ro-ferge    |
| 2 LNG-skip        | 8 Cruiseskip     |
| 3 LPG-skip        | 9 Hurtigruteskip |
| 4 Produkttankskip | 10 Cruiseferge   |
| 5 Bulkskip        | 11 Pendelferge   |
| 6 Containerskip   | 12 Hurtigbåt     |

(B) **Semideplasementsfartøyer:**

- 1 Hurtig ettskrogsfartøy
- 2 Hurtigbåt

(C) **Planende fartøyer:**

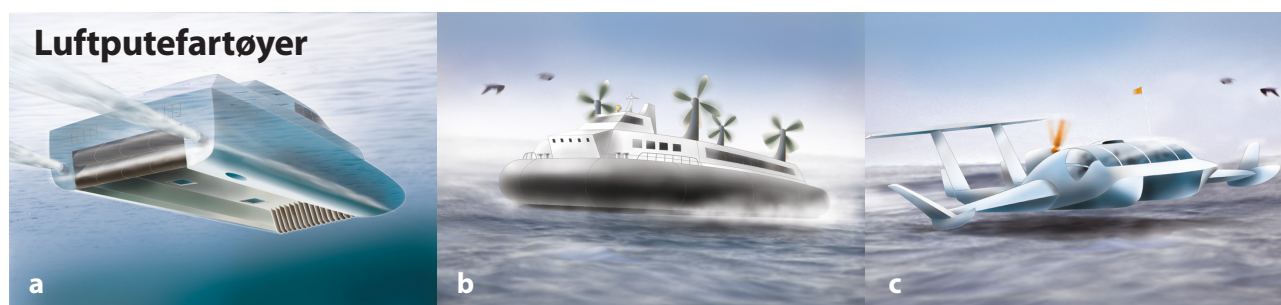
- 1 Fritidsbåter
- 2 Hurtigste fartøy som har krysset Atlanterhavet uten tanking av brensel underveis
- 3 Verdens hurtigste seilbåt
- 4 Båt for offshore-race

(D) **Hydrofoilfartøyer**

- 1 Foil Cat

(E) **Luftputefartøy**

- 1 Kystkorvett (SES)
- 2 Minefartøy (SES)



- a SES-type (Surface Effect Ship). Luftputen begrenses av katamaranens to skrog og fleksible "skjørt" foran og bak. Luftputa gir bærekraft lik 80 % av tyngden. SES har mindre motstand enn andre katamaraner. Fartøyet drives med vannjet. Kan f.eks. ha en lengde på 40 m og en servicehastighet lik 50 knop. Den største ulempen med prinsippet er slitasje av skjortene, særlig det fremste. Sjøforsvarets nye minesveipere er av SES-type.
- b ACV-type (Air Cushion Vehicle). Trafikkerte tidligere Engelske kanal, hastighet 90 knop. Framdrift skjer ved hjelp av luftpropeller. Fartøyet kan lande og ta av inne på stranden.
- c WIG-type (wing-in-ground). Konstruksjonen får ekstra løft ved å fly meget nær overflaten.



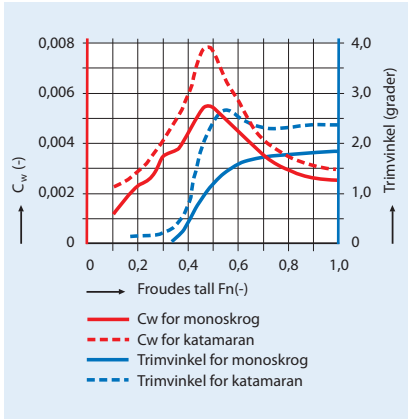
**Undringsoppgave:**

Hva menes med et amfibisk fartøy? Er noen av fartøylene vist ovenfor amfibiske?

Alle illustrasjoner er hentet fra boka "Hydrodynamics of High Speed Marine Vehicles" av Professor Odd Faltinsen, NTNU.



# Hurtiggående fartøyer: Semideplasementsfartøyer og planende fartøyer



## Bølgemotstandstall ( $C_w$ ) og trimvinkel som funksjon av Froudes tall for ettskrogsfartøy og katamaran.

Verdiene baseres på modellforsøk utført ved MTS av Molland o.a. Katamaranmodellens to skrog er framstilt ved deling av monoskroget på langs. Begge modeller prøves dermed under så like forhold som mulig. Årsaken til at  $C_w$  er større for katamaranskrogene enn for monoskroget på tross av samme deplasement, er interaksjon mellom bølgene fra de to skrogene.



Begge illustrasjoner er hentet fra boka *Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles* av prof. Odd Faltinsen, NTNU

## Semideplasementsfartøyer (halvplanende)

Som påpekt i tabellen på side 3-18 har slike fartøyer en hastighet og en skrogform/trim som gjør at oppdriften (hydrostatisk trykk) i betydelig grad erstattes av løftekrefter fra hydrodynamisk trykk. Det skiller gjerne mellom følgende tre hovedtyper:

**Hurtige enskrogsfartøyer.** Disse er som oftest ferger for passasjerer med biler, og kan ha hastigheter på opptil 40 knop og skroglengder på over 120 m. De bygges normalt i aluminium og designes med stor bredde og liten dypgang. Av hensyn til passasjerenes komfort utføres de vanligvis med systemer for kontroll av bevegelsene i sjøen. Slike systemer er for eksempel både aktive og passive finner og foiler.

**Katamaraner.** Dette er den vanligste typen av hurtiggående fartøyer, se figurer side 2-13 og nedenfor. De to skrogene er relativt slanke. Typiske skroglengder er 35 –40 m. Maskinerieffekten er stor nok til å gi hastigheter på ca 40 knop, noe som svarer til Froude-tall lik ca 1,0. Mange tror at "populariteten" til katamaraner skyldes at de har mindre motstand enn for eksempel et tilsvarende ettskrogsfartøy. Det er ikke tilfelle, se sammenligning mellom bølgemotstandene i figur til venstre. Her ser vi at to skrog (altså katamaran) gir større bølgemotstandstall enn ett skrog med samme volumdeplasement. Dessuten vil en fordeling av et gitt deplasement på to skrog gi større våt overflate enn ett skrog.

Figuren viser også et annet, meget interessant fenomen. Vi ser at bølgemotstandstallene for både ettskrogs- og katamaranmodellen har et maksimum ved et Froude-tall omtrent lik 0,5. Også grafene for modellenes trimvinkler viser interessante forløp. Trimmen vil "av seg selv" begynne å øke omtrent ved  $Fn = 0,3$  og øke kraftig fram mot  $Fn = 0,5 - 0,6$ . Dette skyldes virkninger fra det hydrodynamiske trykket. Eksempel på bruk av bølgemotstandstall til overslagsberegning av totalmotstand og effektbehov for en katamaran er behandlet i oppgave 13.

Hovedårsaken til katamaranenes suksess som hurtiggående fartøy er først og fremst at de har meget god stabilitet selv ved de høye hastigheter som karakteriserer disse fartøyene. For ytterligere å bedre komforten for passasjerer om bord, utstyres fartøyene dessuten med automatiske reguleringsystemer for reduksjon av bevegelsene i sjøen. Særlig gjelder dette vertikale akselerasjoner, som lett kan forårsake sjøsyke. Man bruker da lignende systemer som nevnt ovenfor for ettskrogsfartøyer.

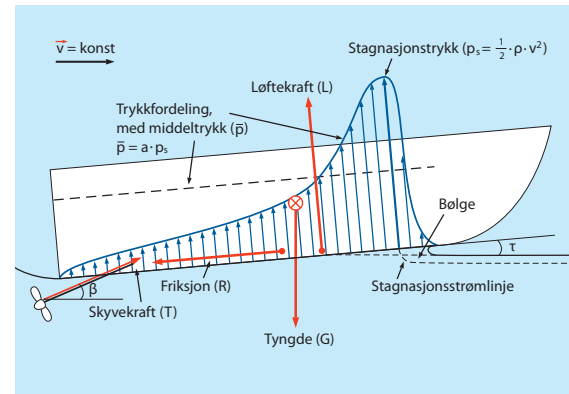
**Ettskrogsfartøyer med to eller fire utliggerskrog.** Slike konsepter er spesielt aktuelle for transport av gods som skal fort fram. Dette forutsetter hurtige skip (30-40-knop) med lengder 150-250 m, Det baseres da på meget slanke hovedskrog, som av hensyn til stabiliteten da må suppleres med utliggerskrog (outriggers), se figur.

## Planende fartøyer

Slike fartøyer brukes til patruljering, ambulanseformål, fritidsaktiviteter, offshoreracing, osv. Dette er fartøyer som normalt har skrog med lengder mindre enn ca 30 m og hastigheter som gir Froudes tall større enn ca 1,0. Da vil løftekraften i vesentlig grad skrive seg fra hydrodynamisk trykk og bare i svært liten grad fra hydrostatisk trykk (oppdrift)

**Virkemåten for et planende fartøy** kan skjematisk illustreres som vist i figur. Vi tenker oss en flatbunnet konstruksjon som beveger seg med konstant hastighet ( $v$ ) og med en trimvinkel ( $\tau$ ). Vannet vil da "hope seg opp" under fremste del av båten slik som vist i figuren. Dette resulterer i et stagnasjonstrykk ( $\frac{1}{2} \rho v^2$ ) og en trykkfordeling under fartøyet som illustrert. Løftekraften ( $L$ ) kan bestemmes når bunnarealet ( $S$ ) og midlere verdi av trykkfordelingen er kjent v.h.j.a. faktoren  $a$ . Øvrige krefter som virker på fartøyet, framgår av figuren. Det vises for øvrig til oppgave 3.xx.

For å forklare prinsippet har vi ovenfor tatt utgangspunkt i et fartøy med flat bunn. Planende fartøyer har i virkeligheten en V-lignende bunn. Forholdene er da mer kompliserte. Det finnes imidlertid dataprogrammer for beregninger av slike planende båter, se nedenfor.



### Ytre krefter på planende fartøy

$$L = \bar{p} \cdot S = a \cdot p_s \cdot S = a \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S$$

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \cdot c_f \text{ (se s. 3-10 og 3-11)}$$

Når tyngden ( $G$ ) er gitt, kan nødvendig skyvekraft ( $T$ ) deretter beregnes av Newtons 1. lov på vektorform:

$$\vec{L} + \vec{T} + \vec{R} + \vec{G} = 0$$

Talleksempler tas opp i oppgavene 3.xx og 3.yy

## Undringsoppgave:

### Oppgave med bruk av dataprogram.

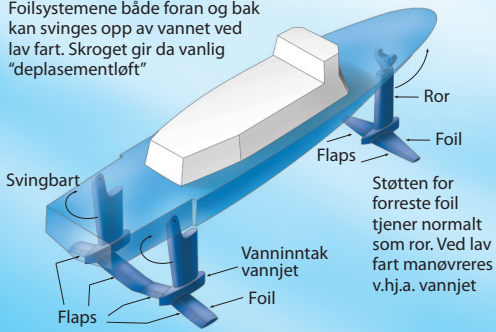
En båtprodusent har en modell med følgende data: .....

- Hvor stor hastighet kan du forvente at båten vil gjøre hvis du utruster den med en motor som gir xx kp skyvekraft ?
- Lag en graf som viser hvilken trimvinkel båten vil få ved ulike hastigheter

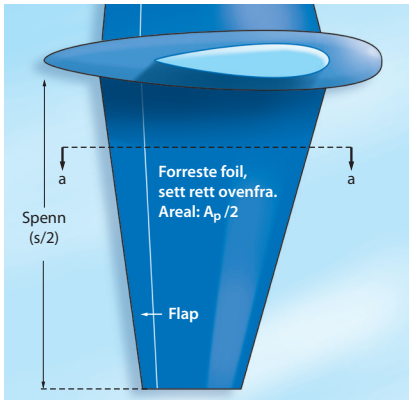


# Hurtiggående fartøyer: Hydrofoilfartøyer

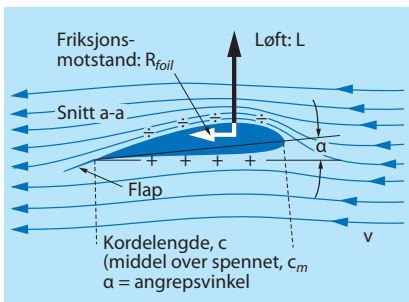
Foilsystemene både foran og bak kan svinges opp av vannet ved lav fart. Skroget gir da vanlig "deplasementløft"



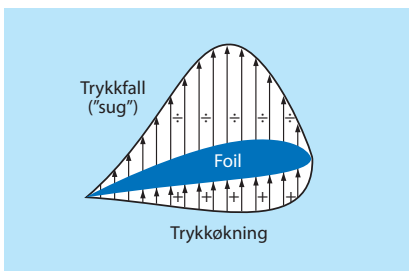
**Ettskrogs hydrofoilfartøy drevet med vannjet**



**Detalj av hydrofoil**



**Strømningsforhold ved hydrofoil**



**Løftkraft på foilen genereres både av over- og undertrykk**

## Foilteori

En hydrofoil er en vinge som virker i vann på samme måte som en flyvinge genererer løftkraft i luft. Vi kan også kalle den et bæreplan. Både enskrogsfartøyer (se figur) og katamaraner kan utstyres med slike foiler. Fordi også propeller og ror for konvensjonelle fartøyer er formet som hydrofoiler og prinsipielt virker på samme måte, er foilteorier en viktig del av hydrodynamikken. Derfor skal vi nedenfor se litt nærmere på virkemåten, som egentlig også gjelder for flyvinger. Foiler brukes også ofte for å dempe uønskede bevegelser i sjøen, for eksempel rullebevegelser.

**Hvordan oppstår løftkrefter på en hydrofoil?** En hydrofoil har en form som vist i figuren og er orientert med en viss vinkel i forhold til strømmingen. Vi ser at en vannpartikkel som følger en strømlinje på oversiden av foilen må bevege seg en lengre strekning enn en vannpartikkel som følger en strømlinje på undersiden. Strømningshastigheten er altså større, og strømlinjene ligger tettere på oversiden enn på undersiden. Av Bernoullis ligning på side 3-8 skjønner vi da at den økte hastigheten medfører en øking i leddet  $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$  og dermed en tilsvarende reduksjon av trykket  $p$ . Langs strømlinjen på undersiden skjer det motsatte. Hastigheten reduseres og trykket øker i forhold til det midlere trykket. Trykkdifferensen mellom over- og underside resulterer dermed i en vertikalt rettet løftkraft.

Det er to grunner til at vannets hastighet på foilens overside er større enn på undersiden.

- Foilen er utført med en spesiell form (krumning og tykkelse)
- Den er orientert med en viss angrepsvinkel i forhold til strømningsretningen.

Den resulterende løftkraft presenteres gjerne som et dimensjonsløst tall, løftetallet  $C_L$ , på lignende måte som vist på side 3-13 for den totale framdriftmotstanden for et deplasementsskrog. Vi henfører imidlertid ikke løftet  $L$  til den våte overflaten  $S$ , men til foilens projiserte areal i vertikalretningen ( $A_p$ ). Dermed kan vi altså definere løftetallet slik:

$$C_L = L / (0,5 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A_p)$$

Kjennes løftetallet  $C_L$ , kan løftet  $L$  beregnes av denne ligningen. Det vil føre altfor langt å gå nærmere inn på utledning av hva som bestemmer løftetallet, men denne fører fram til følgende, forbausende enkle uttrykk som funksjon av angrepsvinkelen  $\alpha$  (målt i radianer):

$$C_L = (0,3 + 2 \cdot \pi \cdot \alpha) K_{korr}$$



Det ukorrigerede løfttallet som funksjon av angrepsvinkelen er vist grafisk på figur. Leddet 0,3 skyldes profilkrumningens bidrag til det totale løftet og kan variere litt. Korreksjonsfaktoren  $K_{korr}$  tar hensyn til at full trykkdifferens mellom foilens over- og underside ikke kan opprettholdes ved foilspennets ytterpunkter. Ved typiske trykkfordelinger langs spennet kan faktoren beregnes som beskrevet i figurteksten. Vi skjønner at den nærmer seg 1,0 for smale foiler med stor spennvidde.

**Motstand på hydrofoiler.** Denne vil i hovedsak bestå av friksjonsmotstand på grunn av vannets viskositet, som omtalt på side 3-10. For beregning av friksjonsmotstandstall kan vi derfor legge til grunn den samme formel som der ble oppgitt. Når vi skal bestemme Reynolds tall for en foil, må vi imidlertid bruke kordlengden ( $c$ ) som karakteristisk lengde. I beregning av friksjonsmotstandstallet må vi også ta hensyn til foilens tykkelse ( $t_{max}$ ). Dette gjøres som vist i ligningen nedenfor ved hjelp av faktoren  $2 \cdot t_{max}/c$  (kan utledes teoretisk og bekreftes eksperimentelt). Vi skal videre være oppmerksomme på at det i foilteorien har blitt vanlig å *henføre både løfttallet og friksjonsmotstandstallet til det projiserte foilarealet  $A_p$  som forklart foran*. Tilnærmet vil  $S = 2 \cdot A_p$  (fordi våt overflate er omtrent dobbelt så stor som den projiserte flaten). For å få fram den virkelige friksjonsmotstand uttrykt som kraft, må vi derfor innføre faktoren 2 i formelen for motstandstallet nedenfor. Etter dette kan det dimensjonsløse friksjonsmotstandstallet og friksjonsmotstanden for foiler skrives slik:

$$C_{f,foil} = 2 \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot t_{max}}{c}\right) \cdot \frac{0,075}{(\log R_n - 2)^2}$$

$$R_{f,foil} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A_p \cdot C_{f,foil}$$

Hermed har vi vist hvordan både løft og motstand prinsipielt kan estimeres for en hydrofoil. De samme resonneringer kan også brukes på en flyvinge, se oppgavene 3.xx – 3.yy.

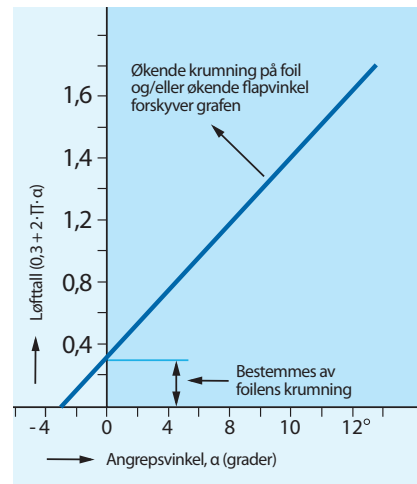
**Vurdering av hydrofoilfartøyer.**

Som vi skjønner, er slike fartøyer teknologisk sett meget avanserte. Hovedfordelen er at de egner seg svært godt til høye hastigheter og dermed til passasjertransport. Det velges ofte vannjet som framdriftssystem, se for eksempel figur på side 3-xx. Konsekvensene av alle de avanserte konstruksjonene er imidlertid både høye produksjons- og vedlikeholds-kostnader. Fartøyene er også mer kompliserte i drift, blant annet fordi bevegelse av hydrofoiler og flaps krever aktive, avanserte reguleringsystemer.



**Undringsoppgave:**

Klipp ut en ca 5x20 cm rektangel av papir. Hold det inntil underleppa og blås på oversiden av papiret. Hvorfor løfter den frie enden seg opp ?



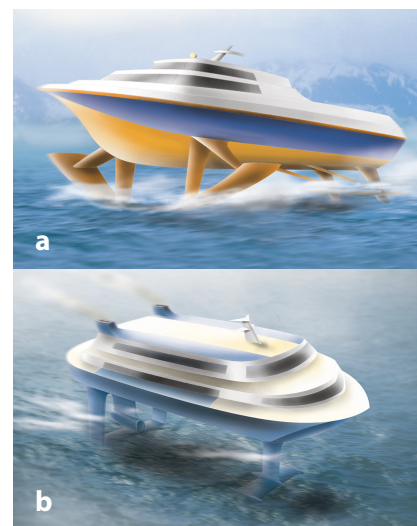
**Løfttall som funksjon av angrepsvinkel for foil med meget stort spenn/korde-forhold og uten flaps**

Fordi trykkfordelingen langs en foil ikke holder seg konstant, må løfttallet fra grafen korrigeres ved hjelp av

$$K_{korr} = s / (s + 2 \cdot c_m)$$

hvor  $s$  er foilens totale spenn og  $c_m$  dens midlere kordelengde.

Foilteorien viser at grafen begynner å flate ut ved ca 12 graders vinkel. Deretter vil den avta og resultere i såkalt steiling (stalling). Årsaken til dette er kavitasjon (se senere).

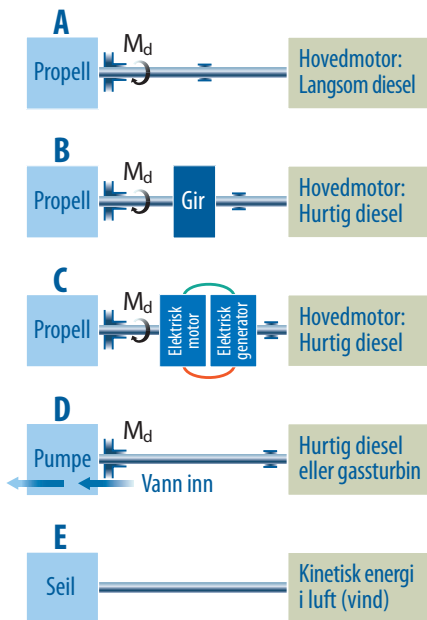


**To hovedtyper hydrofoilsystemer:**  
**a Overflateskjærende system**  
**b Fullt neddykket system**

Illustrasjonene er hentet fra boka "Hydrodynamics of High-Speed Marine vehicles" av prof. Odd Faltinsen, NTNU

# Oversikt over framdriftssystemer.

## Propellens virkemåte



### Framdriftssystemer

**Prinsipper for generering av skyvekraft.** Oppgaven for et fartøys framdriftssystem er å generere en skyveeffekt som kan balansere med den effekt som svarer til fartøyets motstandskrefter (motstandseffekten, også kalt slepeeffekten, se side 3-15). En oversikt over de fem mest aktuelle framdriftssystemer er vist i figur til venstre. Det framgår at den nødvendige skyvekraft i prinsippet genereres på tre ulike måter: **Propell, vannjet og seil.** Vi skal se litt nærmere på disse og starter med propellen, som klart er den mest brukte av de nevnte. Nærmere omtale av de øvrige enheter som inngår i systemene (hovedmotor og gir) vil bli behandlet i hovedkapittel 5.

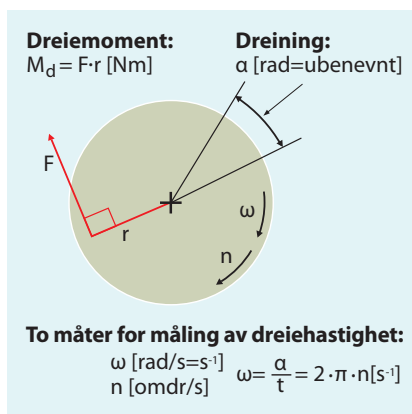
Vi ser av figuren at en propell alltid får tilført energi i form av et dreiemoment på en roterende aksel. **Oppgaven til en propell er dermed å omforme dette dreiemomentet til en skyvekraft som virker i fartøyets bevegelsesretning.** Før vi begynner å forklare hvordan propellen løser denne oppgaven, er det imidlertid hensiktsmessig å "friske" opp en del fundamentalt stoff fra den delen av fysikken som vi kaller mekanikk. Særlig viktig er da begrepene energi, arbeid og effekt, som er behandlet i forbindelse med *rettlinjet bevegelse* både i Ergo 1 og Rom, stoff og tid, 1. Disse begrepene må imidlertid utvides til også å omfatte *roterende bevegelse*, noe som kortfattet er gjort nedenfor.

### Dagens mest aktuelle framdriftssystemer til sjøs

- A Langsomtgående dieselmotor (gir er da unødvendig)
- B Hurtiggående dieselmotor (med gir)
- C Dieselelektrisk system
- D Vannjetsystem med hurtiggående dieselmot eller gass-turbin som hovedmotor
- E Seil

### Grunnleggende mekanikk for roterende legemer

Mekanikk er betegnelsen på den del av fysikken hvor vi først og fremst lærer om sammenhengen mellom kraft og bevegelse. Bevegelser kan skje på mange forskjellige måter, men de to hovedtypene som er mest relevante for det foreliggende kapitlet, er rettlinjet **forflytning** av et legeme og **rotasjon** av et legeme rundt en aksel. I tabellen nedenfor er sammenstilt ligninger som gir sammenhengene mellom de viktigste størrelsene som vi har med å gjøre både i dette og flere etterfølgende kapitler. Alle ligningene er godt kjente fra faget fysikk når det gjelder rettlinjet forflytning. Utvidelsen til et ligningssett også for roterende bevegelse blir nærmest selvforklarende, særlig hvis vi merker oss følgende:



### Viktige størrelser i roterende bevegelse

Når det gjelder den rettlinjede bevegelsen, vil det være **kraft F (målt i N)**, strekning  $s$  (m) og hastighet  $v$  (m/s) som spiller hovedrollene i bestemmelse av for eksempel arbeid og effekt. I rotasjonens "verden" vil derimot disse rollene overtas av henholdsvis **dreiemoment  $M_d$  (målt i N·m)**, rotasjonsvinkel  $\alpha$  (målt i den ubenevnte enheten radianer), og vinkelhastighet  $\omega$  (rad/s = s<sup>-1</sup>).

Fysiske størrelser	Rettlinjet bevegelse	Roterende bevegelse
Forflytning/Dreining	Strekning $s$ (m)	Rotasjonsvinkel $\alpha$ (rad = -)
Hastighet/Dreiehast.	$v = s / t$ (m/s)	$\omega = \alpha / t = 2 \cdot \pi \cdot n$ (s <sup>-1</sup> )
Kraft/Dreiemoment	$F$ (N)	$M_d = F \cdot \text{arm}$ (N·m) (se figur)
Arbeid	$W = F \cdot s = F \cdot v \cdot t$ (J, kJ)	$W = M_d \cdot \alpha = M_d \cdot \omega \cdot t = M_d \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \cdot t$
Effekt	$P = W / t = F \cdot v$ (W, kW)	$P = W / t = M_d \cdot \omega = M_d \cdot 2 \cdot \pi \cdot n$

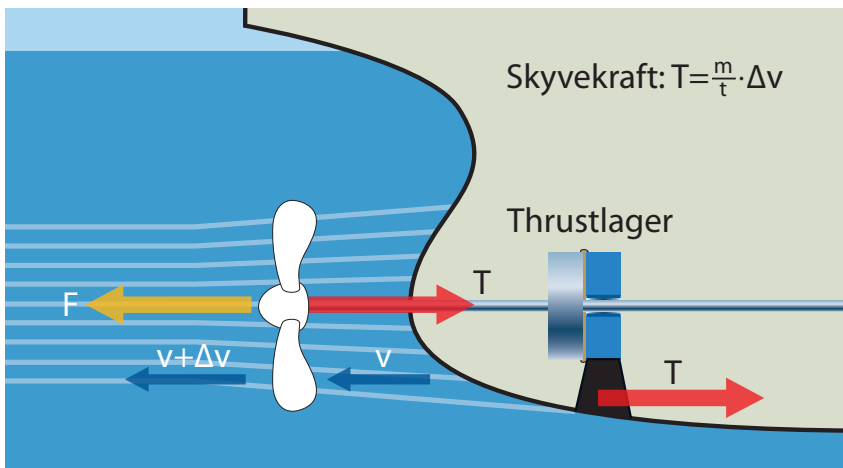
## Propellens virkemåte

Propellteoriene er kompliserte og ligger langt utenfor rammen av denne boka. Propeller er imidlertid så sentrale innen skipsteknologien at vi likevel ikke bør overse temaet helt.

**Forenklet forklaring på hvordan en propell virker.** En propell består som kjent av flere propellblader som er skråttstilt på et boss (nav). Vi ser først på propellen som ei skive med et stort antall slike blad, se figur nedenfor. Når skiva roterer, gir den vannet en viss tilleggshastighet ( $\Delta v$ ) i aksial retning. Vi ser bort fra tangentielle tilleggshastigheter. En vannmasse  $m$  må ha blitt påvirket av kraften:

$$F = m \cdot a = m \cdot \frac{\Delta v}{t} = \frac{m}{t} \cdot \Delta v$$

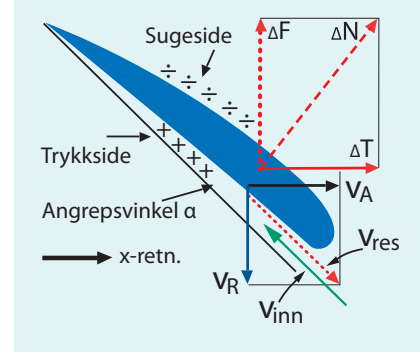
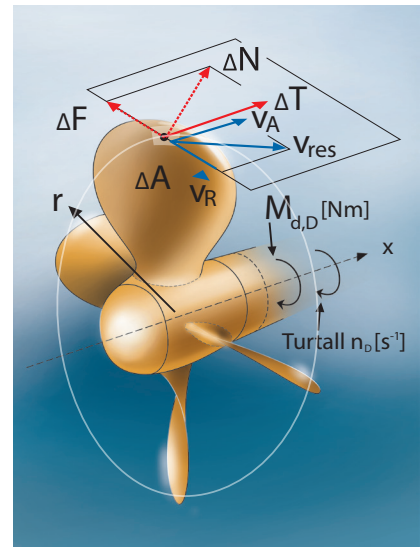
Denne formen på Newtons 2. lov utdypes i Fysikk 2 i forbindelse med impulsloven. Kraften som virker på vannet er farget med oransje. Ifølge Newtons 3. lov gir dette en like stor motkraft (skyvekraft, farget med rødt), som virker på propellen og som overføres til fartøyet gjennom et thrustlager.



**Forklaring av virkemåte basert på impulsloven.** Skyvekraft :  $T = \frac{m}{t} \cdot \Delta v$  hvor  $m/t =$  massestrøm (kg/s) og  $\Delta v =$  hastighetsøkning på vann

### Forklaring basert på propellen som foil.

Vi har på side 3-20 nevnt at en propell genererer krefter på samme måte som en foil. Propellbladene er derfor utformet med typisk foilprofil, se figur til høyre. Når propellen roterer, strømmer vannet på begge sider av propellbladene og frambringer en trykkside og en sugeside. Bladene er orientert slik at strømlinjene på trykksiden kommer inn med en viss angrepsvinkel. I figuren illustrerer de blå vektorene hastigheten på trykksiden av det bladet som i øyeblikket har en vertikal posisjon. Dette arealet har en resulterende hastighet som framkommer som vektorsummen av framgangshastigheten ( $v_A$ ) og propellens rotasjonshastighet ( $2 \cdot \pi \cdot n_D \cdot r$ ). Vanninnstrømmingens hastighet ( $v_{inn}$ ) illustreres dermed av den motsatt rettede, grønne vektoren. Denne gir angrepsvinkelen  $\alpha$  og skaper en trykkdifferens på begge sider av arealet  $\Delta A$ . På samme måte som for hydrofoilen genereres dermed en normalkraft ( $\Delta N$ ). Denne dekomponeres i en skyvekraft ( $\Delta T$ ) og en komponent ( $\Delta F$ ) som gir et dreiemoment  $\Delta M_{d'} = \Delta F \cdot r$ . Hvis vi samler sammen kreftene fra alle propellbladenes totale overflater, vil tilhørende dreiemoment balansere med dreiemomentet som tilføres propellen fra motoren. Newtons 1. lov gjelder nemlig ikke bare for krefter, men også for dreiemomenter (forutsatt konstant hastighet). Tilsvarende gir en samling av skyvekraftene en resulterende skyvekraft  $T$  i framdriftsretningen.



Snitt langs en sirkelbue med radius  $r$ , sett ovenfra

### Propellens virkemåte som foil

#### Hastigheter:

$v_A =$  framgang for areal  $\Delta A$  i forhold til vannstrømmen

$v_R =$  tangentiell bevegelse fra rotasjonen:  $v_R = 2 \cdot \pi \cdot n_D \cdot r$

$v_{res} =$  resulterende bevegelse av arealet  $\Delta A$

$v_{inn} =$  resulterende strømvektor inn på propellbladet

#### Krefter:

$\Delta N =$  kraft generert fra trykkdifferens  $\Delta p$  på begge sider av arealet  $\Delta A$  :  $\Delta N = \Delta p \cdot \Delta A$

$\Delta T =$  komponent som gir bidrag til skyvekraft (thrust) i x-retn., (skipets framdriftsretning)

$\Delta F =$  komponent som gir "motdreiemoment" ( $\Delta M_{d'} = \Delta F \cdot r$ ) til dreiemom. som leveres propell fra hovedmotoren

Resulterende, samlede krefter  $N$ ,  $T$  og  $F$  finnes ved å integrere bidragene ovenfor over alle propellbladenes totale overflater.



# Oversikt over virkningsgrader i framdriftssystemer. Propulsjonsvirkningsgrad

## Effektposter og virkningsgrader for framdriftssystem med propell

### Effektposter (W):

- $\dot{E}_{tilf}$  = kjemisk energi tilført pr. tidsenhet med brensel
- $\Delta P_{hm}$  = tap pga. termisk energi i avgass og kjølevann
- $P_B$  = levert fra hovedmotor til overføringsaksel
- $\Delta P_{ko}$  = tap pga. friksjon i lagre og eventuelt gir
- $P_D$  = levert til propell
- $P_D = 2 \cdot \pi \cdot M_{d,D} \cdot n_D$
- $\Delta P_p$  = tap primært pga. kinetisk energi i kjølvannet, generert av propell
- $P_E$  = levert nyttig effekt av propell, balanserer med slepeeffekten:  $P_E = R \cdot v_S$

### Virkningsgrader (-):

Effektiv, termisk v.grad for hovedmotor:  $\eta_{e,hm} = \frac{P_B}{\dot{E}_{tilf}}$

Overføringsvirkningsgrad:

$$\eta_{ko} = \frac{P_D}{P_B}$$

Propulsjonsvirkningsgrad:

$$\eta_{ko} = \frac{P_E}{P_D} = \frac{R \cdot v_S}{2 \cdot \pi \cdot M_{d,D} \cdot n}$$

Totalvirkningsgrad:

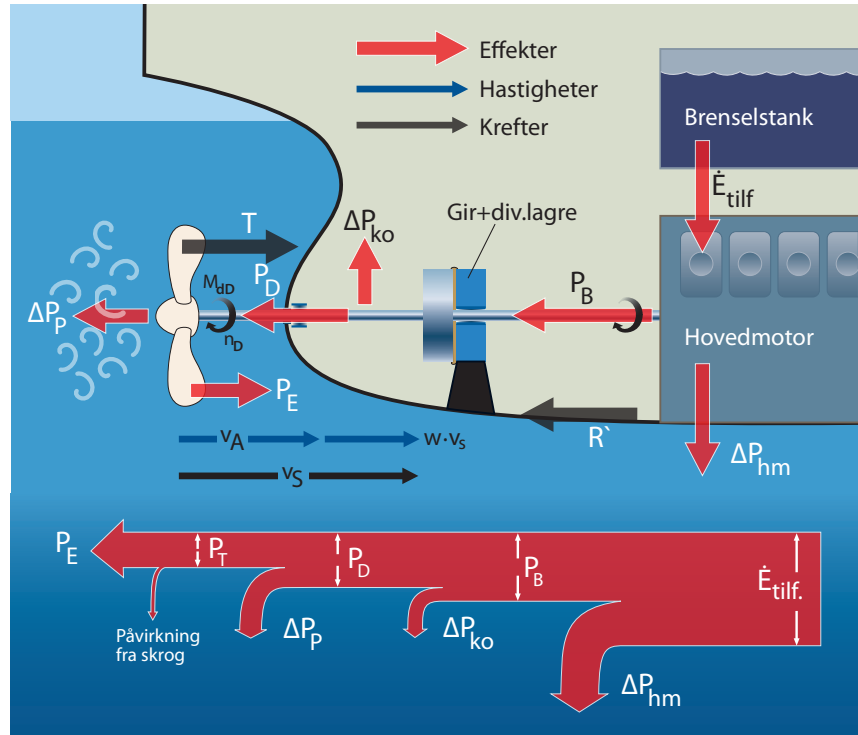
$$\eta_{tot} = \eta_{e,hm} \cdot \eta_{ko} \cdot \eta_D$$

### Hastigheter (m/s):

- $v_S$  = skipets framgangshastighet gjennom vannet
- $w \cdot v_S$  = medstrøm. Skroget vil dra med seg vann i et sjikt som øker i tykkelse akterover og som ved propellen kan beskrives med hastigheten  $w \cdot v_S$ . Typisk verdi på medstrømsfaktoren:  $w = 0,2$ .
- $v_A$  = propellens framgangshastighet gjennom vannet
- $v_A = v_S - w \cdot v_S = v_S (1-w)$

### Krefter (N)

- $R'$  = totalmotstand for skipet med arbeidende propell
- $T$  = skyvekraft fra propell



Teknologiske prosesser og systemer går alltid med et visst tap av energi. Tapets omfang uttrykkes ved hjelp av systemets virkningsgrad, som kan defineres på energibasis eller effektbasis. Generelt gjelder:

$$\text{Virkningsgrad, } \eta = \frac{\text{nyttig energi}}{\text{tilført energi}} = \frac{\text{nyttig effekt}}{\text{tilført effekt}} = \frac{\text{tilført} - \text{tap}}{\text{tilført}}$$

Vi skjønner at virkningsgraden innvirker på et systems energiforbruk og analyser av hva som bestemmer virkningsgraden er derfor meget viktig. Aktuelle virkningsgrader i et komplett framdriftssystem er illustrert ovenfor. Vi skal her ta for oss propulsjonsvirkningsgraden, men kommer tilbake til virkningsgrader for hovedmotor og kraftoverføring i et senere kapittel.

## Propulsjonsvirkningsgrad

Det skiller gjerne mellom propellvirkningsgrad og propulsjonsvirkningsgrad, avhengig av om propellen arbeider under ideelle forhold (i fri vannstrøm) eller under de virkelige forhold, som for eksempel bak et skipsskrog.

**Propellvirkningsgrad.** Denne bestemmes ved at en modell av propellen festes under en vogn i en slepetank og dras for forskjellige hastigheter gjennom vannet. Samtidig drives propellen av en elektrisk motor. Tilført turtall og dreiemoment måles, sammen med den skyvekraft som propellen genererer. Overfører vi verdiene av disse størrelsene fra modell til fullskalaskip, får vi følgende uttrykk for beregning av propellens virkningsgrad når den arbeider i fritt vann:

$$\eta_0 = \frac{P_T}{P_D} = \frac{T \cdot v_A}{2 \cdot \pi \cdot M_{d,D} \cdot n_D}$$

Når det er mange variable størrelser som inngår i et problem, har vi tidligere påpekt at det er hensiktsmessig å presentere måleresultater ved å samle disse i dimensjonsløse størrelser. I tillegg til de fire ovennevnte størrelsene ( $v_A$ ,  $n_D$ ,  $T$  og  $M_{d,D}$ ), er det klart at propell diameteren ( $D$ ) og vannets tetthet ( $\rho$ ) må være av betydning i problemstillingen. Dette gir totalt seks variable størrelser, og vi kan nå danne ytterligere tre dimensjonsløse grupper av disse:

Skyvekrafttall for propellen:

$$K_t = \frac{T}{\rho \cdot n_D^2 \cdot D^4}$$

Dreiemomenttall for propellen:

$$K_M = \frac{M_{d,D}}{\rho \cdot n_D^2 \cdot D^5}$$

Framgangstall for propellen:

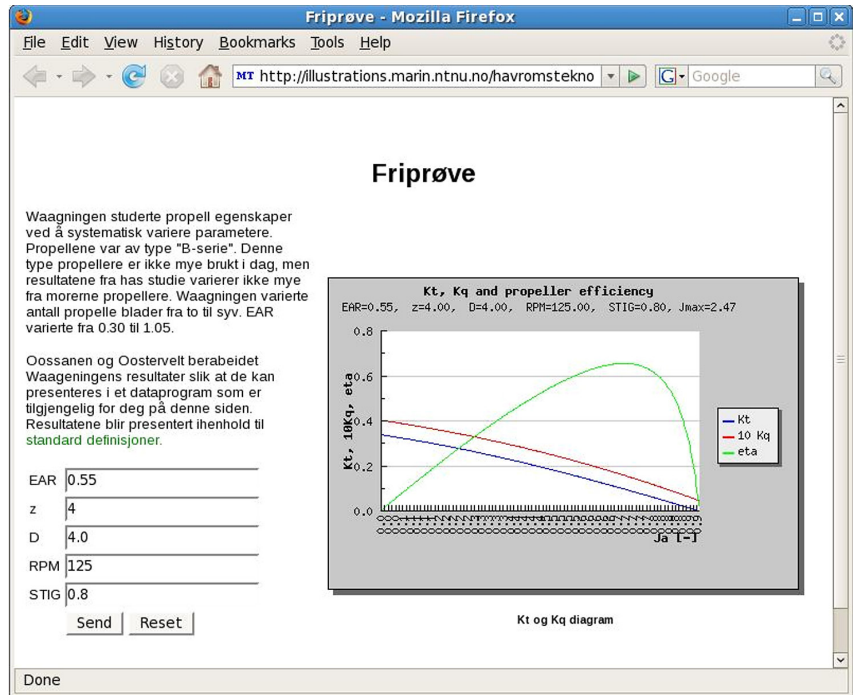
$$J_a = \frac{v_A}{n_D \cdot D}$$

Det vises til oppgave 3.7, hvor det skal påvises at disse gruppene virkelig er dimensjonsløse og dermed kan uttrykkes som rene tall, gjeldende for den undersøkte propellen.

Etter dette kan nå alle de viktigste dataene for den aktuelle propellutformingen med ulike diametere presenteres ved hjelp av et eneste diagram, se figur. Her er propellvirkningsgraden, skyvekrafttallet og momenttallet framstilt som funksjon av propellens framgangstall.

Det er selvsagt at man bør tilstrebe at virkningsgraden blir så høy som mulig for skipets normale belastning. Hvordan vi for øvrig kan bruke diagrammet til å dimensjonere propellen med en diameter som gir den nødvendige skyvekrafteffekt, er omtalt senere.

**Propulsjonsvirkningsgrad.** Når propellen arbeider bak et skrog, møter den andre strømningsforhold enn under en friprøve. For det første vil skrogets motstand øke noe i forhold til den motstand som ble funnet under slepeprøver. Årsaken til dette er økt vannstrøm forbi skrog og ror på grunn av propellens sug, noe som gir økt friksjon i forhold til målingene fra slepeprøven. For det andre vil skroget dra med seg noe vann framover (medstrømmen). Dermed vil propellens framgangshastighet i forhold til vannet ( $v_A$ ) være mindre enn skipets hastighet ( $v_S$ ). Dette er grunnen til at  $v_A$  er brukt i propellens friprøver, som påpekt ovenfor. Det vil føre for langt å gå nærmere inn på de relativt små forskjellene mellom propellvirkningsgrad og propulsjonsvirkningsgrad og vi bruker den sistnevnte i oppgavene lenger bak. Typiske verdier for propulsjonsvirkningsgraden er 0,65-0,75 for tank- og lasteskip med lengder 150-200 m. Generelt synker virkningsgraden når propellens belastning (turtall) øker.



Waagningen program + adresse

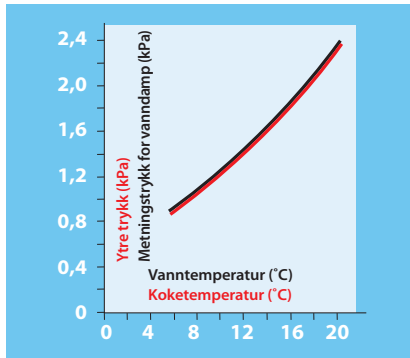


### Undringsoppgave:

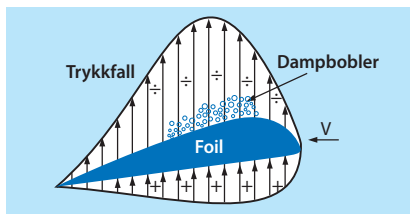
Hvor stor prosentandel av energien i brenslut utnyttes til nyttig arbeid i framdriftssystemet for et skip hvor typiske virkningsgrader er 0,45 for hovedmotoren, 0,95 for gir og lagre i kraftoverføringen og 0,70 for propell-systemet ?

# Kavitasjon.

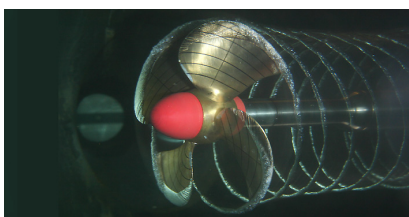
## Dimensjonering av konvensjonell propell



**Sammenheng mellom koketemperatur og ytre trykk.** Over en vannflate vil det alltid være vannmolekyler i dampfase. Disse resulterer i et visst damptrykk, men det er en grense for hvor stort dette damptrykket kan bli. Denne grensen, som kalles metningstrykket, øker med vannets temperatur. Koking vil si fordampning også fra det indre av væsken. Dette skjer når det ytre trykket er lik eller mindre enn metningstrykket. En graf som viser metningstrykk som funksjon av væsketemperatur vil samtidig gi sammenhengen mellom ytre trykk og koketemperatur.



**Dannelse av dampbobler på en foil.** Dampboblene dannes på de delene av foilens overflate hvor trykkfallet er så stort på grunn av strømningshastigheten at det statiske trykket i vannet faller under metningstrykket ved vannets temperatur.



**Kavitasjonstest av propellmodell**

### Kavitasjon

Både propeller og hydrofoiler kan utsettes for kavitasjon. Dette vil si at det dannes små dampbobler på sugesiden av foilformede legemer.

**Kavitasjon er en hovedårsak til at vi sjelden hører om hastigheter over 50 knop til sjøs. Fenomenet kan også forårsake store problemer ved lavere hastigheter.**

**Hvorfor kan kavitasjon oppstå?** Dersom du koker vann ved havoverflaten, vil vannet koke ved 100 °C dersom lufttrykket er 1013 mbar ( $1,013 \cdot 10^5$  Pa) denne dagen. Dersom du er oppe på en fjelltopp, koker vannet ved en noe lavere temperatur, avhengig av hvor stort lufttrykket er på fjelltoppen. Koketemperaturen bestemmes altså av det ytre trykket. For eksempel vil vann med en temperatur 15 °C kunne koke hvis det ytre trykket ble så lavt som 17 mbar (1700 Pa), se graf til venstre. Så lave trykk kan det bli nede i vann som strømmer forbi et propellblad eller en hydrofoil hvis strømningshastigheten er stor nok. På sugesiden av et propellblad kan altså trykket bli så lavt at vannet som strømmer forbi kan begynne å koke. Dermed dannes det små bobler med damp. Disse boblene transporteres videre langs propellbladet og vil raskt komme til områder med lavere strømningshastighet, altså høyere trykk. Da vil boblene implodere (det motsatte av eksplodere) eller vi kan si kollapse. Dersom denne implosjonen skjer nær propellen, vil det føre til støy og vibrasjoner. Omfattende kavitasjon kan endog føre til erosjon (nedbryting) av materialet og ødeleggelse av hele virkemåten til propellen (eventuelt hydrofoilen).

Etter denne forklaring av fenomenet skjønner vi at kavitasjon har lettest for å oppstå ved høye propellurtall og ved bruk av stor stigning på propellbladene. Vi skjønner også at faren for kavitasjon er størst når propellbladet er i posisjon nærmest vannoverflaten.

**Hvorfor bør kavitasjon unngås?** Vi har ovenfor nevnt at både kraftgenereringen og bladmaterialet kan ødelegges hvis en propell utsettes for utstrakt kavitasjon. Selv i beskjeden grad er kavitasjon sterkt uønsket. Sammenbruddene av dampboblene gir støy og kan også medføre uheldige vibrasjoner, noe som er spesielt viktig å unngå for eksempel for cruiseskip og marinefartøy.



## Dimensjonering av konvensjonell propell

Det vises til dataprogrammet "Friprøve" på side 3-27. Før vi gir en kort brukerbeskrivelse av dette, skal vi kort kommentere de parametrene skal gis som input til programmet.

**Propelldiameter (D) og turtall (RPM).** Som det framgår av betegnelsen RPM oppgis propelletturtallet i o/min. Det viser seg at det er mer effektivt å gi store vannmasser en liten fartsøkning enn å gi små vannmasser en stor fartsøkning. Best virkningsgrad har derfor propeller med lavt turtall og stor diameter. Slike propeller finner vi for eksempel på store tankskip. Når det gjelder typiske turtall og propelldiameterer for forskjellige skipstyper og størrelser, vises til en tabell over karakteristiske skipsdata i kapittel 8.

**EAR og antall propellblad (z).** EAR står for "Expanded Blade Area Ratio" og defineres som forholdet mellom utfoldet totalt bladareal og arealet  $\pi \cdot D^2/4$ . Et lite bladareal er ønskelig fordi det vil medføre små tap på grunn av friksjon. I det viste programmet kan EAR varieres mellom 0,30 og 1,05. Bladarealsforholdet vil hovedsakelig være avhengig av antall propellblad. Antall blad (z) kan i programmet variere mellom to og syv. Økes antall propellblad og dermed EAR, vil både propellens kraftgenererende flate og friksjonsmotstanden øke.

**Stigningsforholdet P/D.** Med en propells stigning (P) menes den aksielle strekningen som en propell tilbakelegger under en omdreining når vi tenker oss at den beveger seg som en **skru**e som roterer i et fast gjengeparti. Stigningen måles ved 70 % av propelldiametere. I programmet oppgis stigningen i forhold til propelldiameteren (P/D) og kan variere mellom 0,8 og 1,2. Stort stigningsforhold øker angrepsvinkelen for strømmingen inn på bladene og dermed kraftgenereringen på bladene. Samtidig øker imidlertid faren for kavitasjon.

**Eksempel på propelldimensjonering.** På side 3-14 ble det beregnet motstand og effektbehov for et skip v.h.j.a. programmet "Freeship". Vi skal nå v.h.j.a. programmet "Friprøve" bestemme diameter og virkningsgrad for en propell som kan gi skipet en fart på 20 knop.



En skipspropell kan ha store dimensjoner (bilde: Rolls Royce)

**Gitt:** Skip med volumdeplasement  $28264 \text{ m}^3$  og hastighet  $v_S = 20 \text{ knop}$  ( $10,3 \text{ m/s}$ ). Fra Freeship-programmet avleses: Motstand  $R_{\text{tot}} = 1020 \text{ kN}$  og slepeeffektbehov  $P_E = 10500 \text{ kW}$ . Antatt medstrømfaktor  $w = 0,2$  gir for propellen  $v_A = 8,24 \text{ m/s}$ . Det kan ses bort fra annen interaksjon mellom propell og skrog. Dermed kan vi altså sette  $P_T = P_E$ , som gir:  $T \cdot v_A = R_{\text{tot}} \cdot v_S$ . Dette vil si at propellen må gi en skyvekraft  $T = 1020 \text{ kN} \cdot 10,3/8,24 = 1275 \text{ kN}$ . Propellen skal først baseres på følgende parametere, som altså i dette eksemplet betraktes som gitte: **RPM = 150 omdr/min** ( $2,5 \text{ omdr/s}$ ),  $D=5,0\text{m}$ ,  $EAR = 0,70$ ,  $z = 4$  og  $STIG = 1,0$

**Starter** "Friprøve"-programmet ved å gi de nevnte verdier for EAR, z og STIG som input. Vi beregner framgangstallet,  $J_a = 8,24/(2,5 \cdot 5,0) = 0,66$  (-) og kan dermed avlese  $K_t = 0,19$ . Dette gir en skyvekraft  $T = 0,19 \cdot (1025) \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (2,5 \text{ s}^{-1})^2 \cdot (5,0 \text{ m})^4 = 760 \text{ kN}$ . Virkningsgraden avleses på tilhørende graf til  $\eta = 0,63$

Hvis  $T \neq 1275 \text{ kN}$ , prøv med ny D eventuell ny RPM

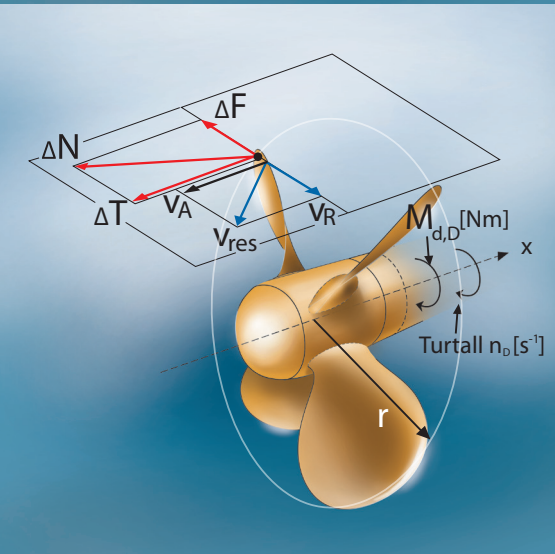
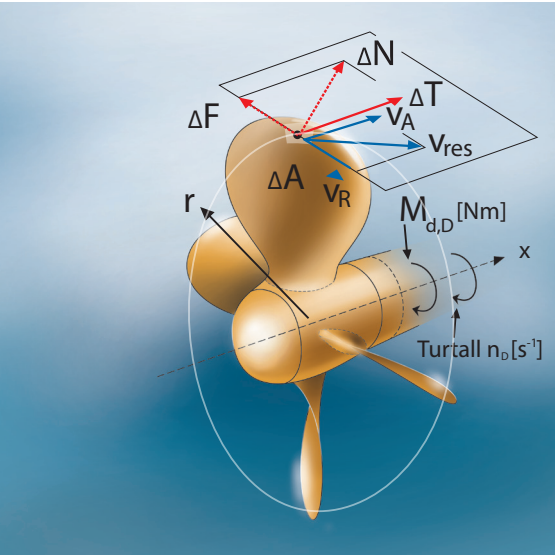
Gjentar prosedyren inntil vi finner en diameter som gir den nødvendige skyvekraften  $T = 1275 \text{ kN}$ . Dette oppnås ved en diameter  $D = 5,5 \text{ m}$ . Vi avleser da en virkningsgrad  $\eta = 0,59$

Hvis  $T = 1275 \text{ kN}$

**Avslutter** prosedyren ved å forbedre virkningsgraden ved finjustering av RPM, EAR, z og/eller STIG, men vi er da inne på detaljer som passer bedre for andre studier enn i vgs.



# Ukonvensjonell propellsystemer



Vi skal avslutte behandlingen av propellsystemer med å beskrive noen systemer som har det til felles at propulsjonsvirkningsgraden forbedres.

## Vridbar propell

I et slikt anlegg kan propellbladene vris under drift, slik at bladenes stigning blir optimal ved forskjellige hastigheter. Dermed vil grafen for propellvirkningsgraden få et flatere forløp enn det som er vist på skjermbildet på side 3-27. Selv ved meget små hastigheter vil både virkningsgrad og propellens skyvekraft være tilfredsstillende. Dette er av spesiell betydning for fartøyer som arbeider under varierende forhold, for eksempel fiskebåter, forsyningskip, taubåter, osv. I tillegg til vesentlig forbedring av manøvreringsegenskapene vil de gode virkningsgradene selvsagt medføre at fartøyets brenselforbruk reduseres.

Enda fordel med vridbare propellblad er at disse på en enkel måte også kan utnyttes til å gi fart akterover, se figur til venstre. Selve vridningen skjer ved at et hydraulisk trykk gir bevegelse av en trekkstang som ligger i en utboring i propellakselen.

## Dysepropell

Propellen er omsluttet av en dyse som har et lengdesnitt formet som en foil., se figur. Når vann suges gjennom dysen gir denne et løft som det framgår av figuren. Løftet gir en nettokraft i samme retning som propellen skyver og effektiviteten til propellsystemet økes. På denne måten kan virkningsgraden forbedres med opptil 10 %. Dysepropellen fungerer best for skip med liten hastighet. Ved store hastigheter vil friksjonsmotstanden på selve dysen overstige den ekstra skyvekraften som oppnås.

Dysen har også den fordel at den bidrar til å hindre at fremmedlegemer kommer inn i propellen. Dette er særlig interessant for en del fiskebåter.

### Vridbare propellblad gjør det enkelt gi full skyvekraft akterover

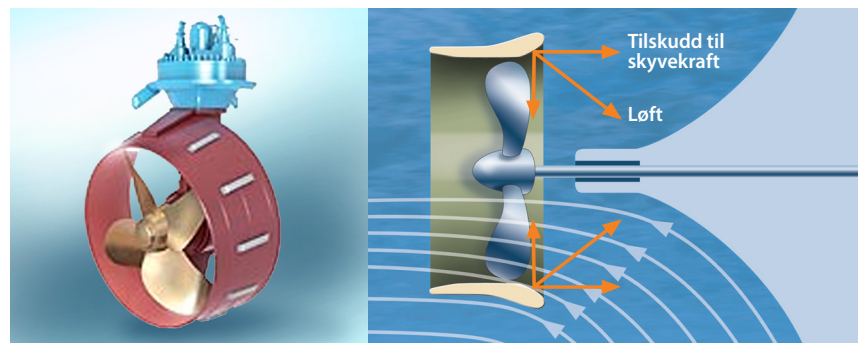
Krefter og propellhastigheter ved:

- a) Fart framover
- b) Fart akterover

### Dysepropell

- a) Rolls Rouce fabrikat
  - b) Krefter som påvirker dysen.
- Radielle komponenter av "løftet" opphever hverandre.  
Aksielle komponenter summeres

En propell bør generelt ikke stå for nær skroget. Dersom den gjør det, kan trykkimpulser overføres til skroget og forårsake støy og vibrasjoner. En dyse rundt propellen vil være med på å dempe slike trykkimpulser.



## Kontraroterende propeller

I strømmen fra en propell vil noe energi eksistere som roterende bevegelsesenergi i virvler. Denne energien går normalt tapt, men utnyttes hvis systemet er utført med kontraroterende propeller. Disse roterer altså hver sin vei, og rotasjonsenergien fra den første propellen blir utnyttet av den bakerste til å øke sin skyvekraft. Dette kan gi en bedring av virkningsgraden på 10 – 15 %, samtidig som propellene kan lages med mindre diameter. Demping av trykkimpulser og dermed forbedring av støynivå er en annen fordel med kontraroterende propeller.

Slike systemer har imidlertid også ulemper. Det kreves komplekse mekaniske løsninger for å legge den ene propellakselen inne i den andre, samtidig som disse skal rotere hver sin vei. Konstruksjonen blir derfor mer kostbar enn konvensjonelle løsninger både når det gjelder investering og vedlikehold.. De brukes derfor først og fremst på skip hvor det stilles spesielle krav til god virkningsgrad eller kompakte konstruksjoner.

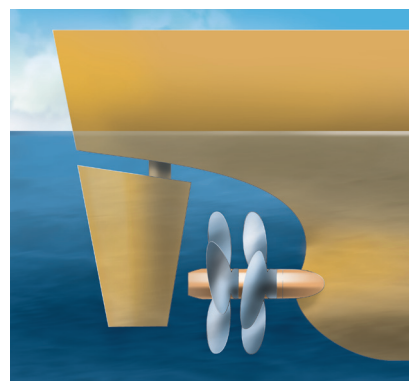
## Propellsystemer for store hastigheter

I hurtiggående fartøyer er det særlig to forhold som gir spesielle utfordringer for propulsjonssystemet. For det første må det tas hensyn til at kavitasjon i større eller mindre grad ikke er til å unngå. For det andre må systemet utformes slik at akseloverføringen fram til propellen (inkludert støttebraketter og lignende) ikke gir for stor tilleggsmotstand ved de høye hastigheter som nå er aktuelle. Innenfor rammen av denne boka er det bare plass til å nevne kortfattede eksempler på konstruktive løsninger som tar hensyn til disse utfordringene.

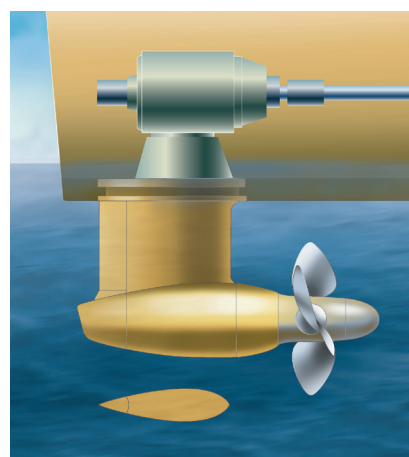
**Superkaviterende propeller.** Som oftest er altså delvis kavitasjon ikke til å unngå og det kan da være hensiktsmessig å basere på såkalte superkaviterende propell. Med dette menes en propell hvor hele sugesiden kaviterer og altså utsettes for vandampens metningstrykk. Dette er oppnådd ved å nytte et relativt stort stigningsforhold. Faktisk kan slike fullt kaviterende flater unngå de skadevirkninger som delvis kavitasjon kan medføre. Slike superkaviterende propeller brukes som oftest ved fartøyhastigheter på 40 knop eller mer. Et eksempel på tilhørende arrangement av kraftoverføring er vist på figur til høyre.

**Overflateskjærende propeller.** For å redusere motstanden av propellaksel og støttebraketter mest mulig utføres kraftoverføringssystemet ofte slik at propellene blir bare delvis neddykket, se figur til høyre. Slike propeller kalles da overflateskjærende (free surface-piercing). De vil nødvendigvis dra med seg noe luft og ved de høyeste turtallene/hastighetene vil sugesiden på propellene være helt tørre, men "hulrommene" er stort sett fylt med luft. Dermed unngås vanlig kavitasjon. De er imidlertid designet for denne tilstanden og kan oppnå tilfredsstillende propellvirkningsgrader ved de høye hastighetene som brukes. Disse er ofte mer enn 50 knop.

En ulempe med disse propellene er at det kan oppstå store vibrasjonskreften når bladene går over fra vann til luft. For å bøte på dette utføres disse propellene ofte med en kraftig bladsveip. Relativt mange propellblad vil også kunne redusere vibrasjonskreftene. En annen ulempe er at det oppstår krefter sideveis fra slike propeller. Derfor arrangeres de i par, se nederste figur.

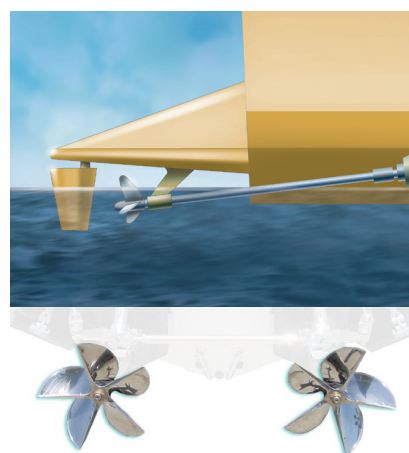


**Kontraroterende propeller**



**Kraftoverføring til superkaviterende propell i hurtiggående fartøy**

Arrangementet gir dragende propell (Ulstein)



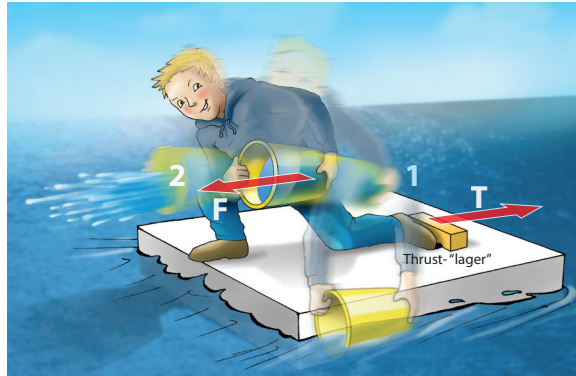
**Overflateskjærende propeller for planende fartøy.**

- Kraftoverføring med skråttstilt propellaksel (gir glattest mulig skrog)
- Propellene arrangeres parvis for å gi best mulig fordeling av skyvekraftene (Progress Ingeniørfirma AS)

# Framdriftssystem med vannjet

## Muskeldrevet puls vannjet

Geir har tidligere vist interesse for å bruke flåten sin til hydrostatisk eksperiment (se oppg. 2-17, 18 og 19). Siden har han fulgt opp med hydrodynamiske forsøk, med utvikling av et nytt framdriftssystem. Han bruker ei bøtte til å kaste vann bakover. Når bøtta akselererer (1-2), utsettes vannet for en midlere kraft  $F = m \cdot a$ . Geir må da samtidig sparke fra med en midlere kraft  $T$  mot thrust-“lageret”. Denne kraften virker som en skyvekraft på flåten. Prosessen gjentas så hyppig han klarer. Skyvekraften  $T$  kommer altså i pulser, men vil holde flåten i bevegelse mot høyre. Det vises til oppg. 3.20



Dette er i dag det vanligste framdriftssystem for hurtiggående fartøy. Er disse utformet som katamaraner, brukes oftest to separate anlegg. Det er to hovedårsaker til at vannjet velges framfor propell-drift. For det første

er et vannjetsystem ikke så følsomt for kavitasjonsproblemer som en propell ved høye hastigheter. For det andre er virkningsgraden bedre ved slike hastigheter.

## Virkemåte

**Anvendelse av Newtons lover.** Det vises til figur til venstre og til den forenklete forklaring på en propells virkemåte som ble gitt på side 3-25. Den samme forklaringen kan også brukes på en vannjet. Forskjellen er bare at i et vannjetsystem foregår akselerasjonen av vannet i et pumpeanlegg inne i fartøyet, mens den i et propelldrevet anlegg foregår utenfor skroget. I begge tilfelle er det Newtons 2. lov som ideelt sett kan legges til grunn for beregning av skyvekraften som genereres. For et kontinuerlig arbeidende system er det greiest å gi denne loven en ny skrivemåte, som også ble vist på side 3-25:

$$F = \frac{m}{t} \cdot \Delta v = \dot{m} \cdot (v_{ut} - v_{inn}) \quad (N)$$

Her er:

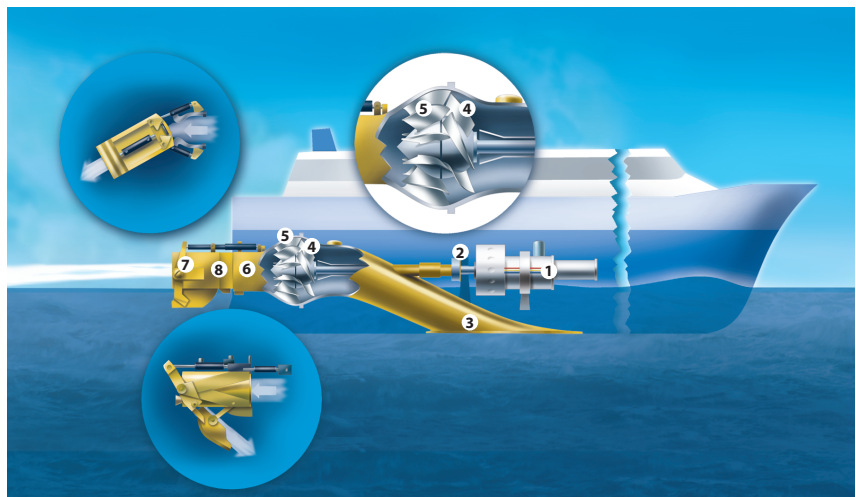
$m$  = vannstrøm (kg /s),

$\Delta V$  = vannstrømmens hastighetsøkning gjennom pumpe-enheten (m/s)

$F$  = kontinuerlig kraft på vannet, gir like stor, men motsatt rettet skyvekraft  $T$  på thrustlager

## Framdriftssystem med vannjet og gassturbin (Rolls Royce)

Systemet virker kontinuerlig, men for øvrig på samme måte som ovenfor. Vann suges inn fra undersiden av fartøyet, gis en akselerasjon i pumpeanlegget (4, 5 og 6) og kastes ut i en stråle bakover. Motkraften til akselerasjonskraften påvirker impelleren og fartøyet thrustlager, hvor det oppstår en skyvekraft som virker framover





**Oppbygging av et vannjetsystem.** Som det framgår av figuren på forrige side, omfatter et vannjetsystem følgende hoveddeler:

1. Gassturbin for drift av pumpe, inkl. gir. Alternativt kan hurtiggående dieselmotor brukes. For anlegg mindre enn ca 1000 kW kan det brukes direkte drift, aktså uten gir.
2. Thrustlager
3. Innløpskanal for vann, tas inn fra skrogets underside
4. Pumpas skovlsystem (impeller), som akselererer vannet
5. Stator med skovlsystem for å gi vannstrømmen en aksial retning
6. Dyse, hvor vannhastigheten øker samtidig som trykket synker
7. Utløpsstråle, like over eller like under vannflaten
8. Manøvreringsenhet, for avbøyning av utløpsstrålen sideveis eller for full reversering

### Fordeler med vannjet framdriftssystem

De viktigste fordelene med et vannjetsystem kan listes opp slik:

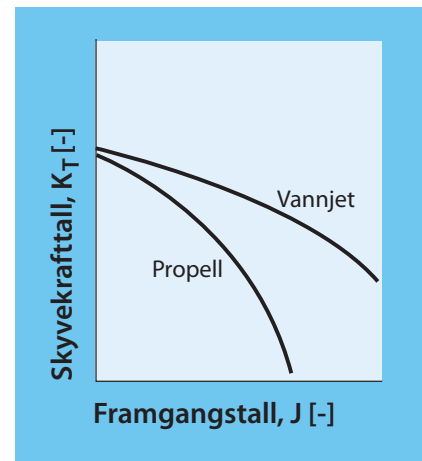
- Ikke så utsatt for kavitasjonsproblemer som et propellsystem
- Flatere graf for skyvekraft som funksjon av fartøyhastighet enn for en propell, se figur øverst til høyre. Også for et vannjetsystem kan vi definere dimensjonsløse størrelser på lignende måte som for en propell (impelleren kan på en måte sammenlignes med en propell): Framgangstall  $J = v_G / (n \cdot D)$  og skyvekrafttall  $K_T = T / (\rho \cdot n^2 \cdot D^4)$ . Her er  $n$  og  $D$  turtall og diameter for pumpeenhetens impeller og  $v_G$  fartøyets hastighet (uten hensyntaken til medstrøm, som er irrelevant for et vannjetsystems virkemåte). Figuren viser tydelig hvor mer effektivt en vannjet er når det gjelder å generere skyvekrefter ved høye hastigheter.
- Den samme tendensen gjenspeiler seg også når det gjelder virkningsgraden, som kan bli meget tilfredsstillende ved høye hastigheter (0,7-0,75).
- Ikke noen appendikser (braketter, ror, propellaksel, osv.) på skroget, altså redusert appendiksmotstand (jf. side 3-12), særlig ved høye hastigheter.
- Mindre totalvekt enn for et komplett framdriftssystem med propell

### Operative karakteristikk

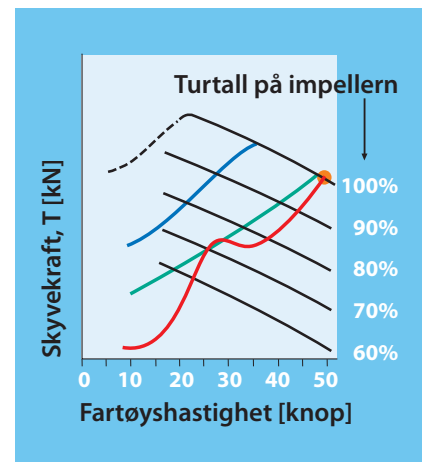
I nederste figur til høyre er vist hvordan effektiv skyvekraft varierer med økende hastighet på fartøyet. Slike diagrammer leveres av vannjet-systemets fabrikant. Vi ser at den skyvekraft som vannjetsystemet genererer ved et gitt, konstant turtall på impelleren synker med fartøyhastigheten, altså den sammen tendensen som den dimensjonsløse framstillingen ovenfor viste. I figuren er det også lagt inn grafer for forskjellige impellerturtall.

I figuren er det videre lagt inn grafer som definerer begrensninger av skyvekraften. Øverste, stiplede graf forteller når det oppstår fullstendig sammenbrudd av skyvekraften og blå graf når kavitasjonsproblemene blir for store. Fabrikanten legger også alltid inn en øvre grense for hvor stor skyvekraft som tåles ved kontinuerlig drift (grønn graf).

Legger man inn en graf for fartøyets totale motstand i samme diagram, kan det kontrolleres at fartøyet oppnår den forutsatte hastighet ved fullt turtall (100 %) på det valgte vannjetsystemet.



**Skjematisk sammenligning av vannjet og konvensjonell propell mht. generering av skyvekraft ved store hastigheter**



### Operative karakteristikk for skyvekraften fra en vannjet, med innlagt graf for totalmotstand for en katamaran.

**Sorte grafer:** Generert skyvekraft ved ulike turtall på impeller

**Blå graf:** Over denne grensen opptrer alvorlig kavitasjon. (kan bare unntaksvis overskrides)

**Grønn graf:** Grense for kontinuerlig drift (kan overskrides i 10 % av driftstiden)

**Rød graf:** Totalmotstand for en katamaran med servicehastighet 50 knop

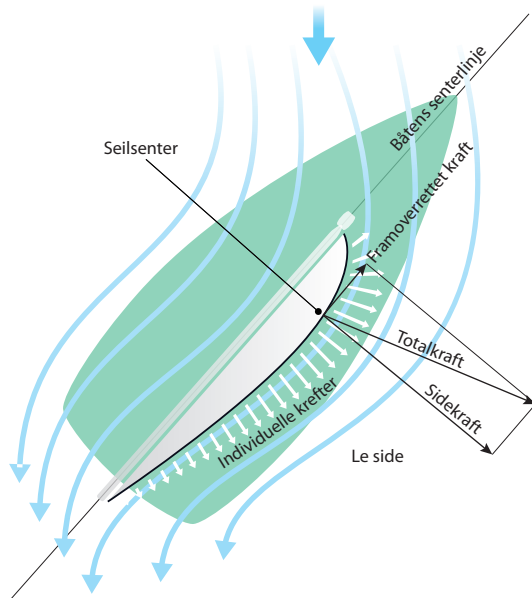
**Gult punkt:** Utgangspunkt for design av fartøyet og valg av vannjetsystem

**Stiplet graf:** Sammenbrudd i generering av skyvekraft

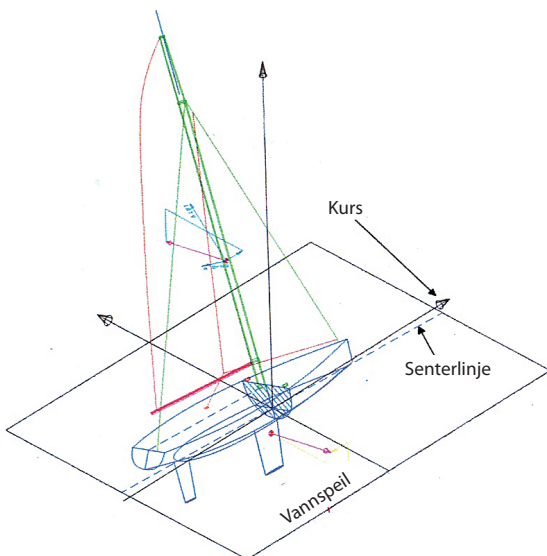


# Framdriftssystem med seil. Seilbåter

Per Werenskiold <sup>x</sup>



**Prinsipiell virkemåte for hvordan et seil genererer en framoverrettet kraft.** Seilet virker som enaerodynamisk foil, jf. forklaring på side 3-22 for en hydrodynamisk foil



**Koordinatsystem og definisjon av retninger. Oversikt over kraftkomponenter**

**Historie. Vikingskipet ga et enormt teknologisprang i utviklingen av seilskip.** Historisk er seilfartøy de tidligste sjøgående fartøyer som utnytter naturens rene energi for kontrollert framdrift. De tidligste effektive seil vises på egyptiske elvebåter fra omkring 3000 år før vår tidsregning. Både fönikere og romere bygde solide fartøyer, opp til 60 m lange, og drev handel i Middelhavet fra omkring år 600 f. Kr. Basert på utvikling av lette og fleksible skrogkonstruksjoner ble et fantastisk teknologisprang gjennomført i de nordiske land i vikingtiden fra år 750 (byggingen av Osebergskipet).

## Generelt om seilbåten som farkost

**Kort om virkemåte.** Seilbåten er en farkost som består av fire hoveddeler: Skrog seil, kjøl og ror. Hovedprinsippet er at krefter genereres som for foilsystemer. Virkemåten for foiler er forklart på side 3-22. Seilet som drivkraft utnytter energi fra vind, skroget med kjøl og andre langskipsarealer gir laterale krefter (sideveiskrefter) som balanserer seilenes laterale kraftkomponenter, og i denne sammenhengen er roret en finne som kan justere og kontrollere balansen.

**Samspillet mellom genererte krefter og mannskapets aksjoner er avgjørende.** Det som er spesielt og spennende for seilbåten, er det helt avgjørende og følsomme samspillet mellom aerodynamiske og hydrodynamiske krefter som må balanseres av mannskapets aksjoner uten hjelp av mekanisk produserte krefter. Seilbåtteorier og vitenskapelig dokumentasjon har hittil stort sett vært basert på forhold i stille vann og med jevn vind. Videre forskning og utvikling må også rette seg mot seiling som et dynamisk fenomen, med seiling i sjøgang, med et komplekst samspill mellom krefter mot skrog, kjøl, ror, rigg, seil og sist, men ikke minst, mannskapets utnyttelse av krefter i seil og trimming av seil.

**Hvilke krefter virker på en seilbåt?** På disse fire sidene skal vi lære mer om de aerodynamiske og hydrodynamiske krefter og samspillet mellom disse, noe som er bestemmende for seilbåtens egenskaper. Kraftbalansen bestemmes først og fremst av:

- Fartøyetets motstand
- Undervannsskrogets evne til å generere sidekraft
- Seilets evne til å generere kraft i ønsket retning i forhold til vindretning
- Mulighetene til å kontrollere kraftbalansen mellom skrog og seil ved hjelp av styringssystemet.

**Et seil virker som en foil.** Før vi ser nærmere på de krefter som virker på en seilbåt, bør vi presisere prinsippet for et seils virkemåte. Prinsippet er det samme som ble forklart på side 3-22 for en hydrodynamisk foil, og kan illustreres som øverst i marginen. Vinden blåser hurtigere på le side og det oppstår en resulterende, aerodynamisk kraft som vist. ( $FA_{TOT}$ ). Denne virker i seilkraftsenteret (CE) og kan dekomponeres i en sideveis kraft og en framoverrettet kraft.

x) "Overingeniør emeritus" ved MARINTEK

## Krefter og geometri ved seiling opp mot vinden (krysning)

Seiling med krysning opp mot vinden er generelt den viktigste og mest kompliserte del av en seilas. Seiling med kryss utfordrer balansen mellom riggens aerodynamiske effektivitet og skrogets hydrodynamiske effektivitet, sammen med skrogets motstand og den statiske og dynamiske stabilitet mot krengeving.

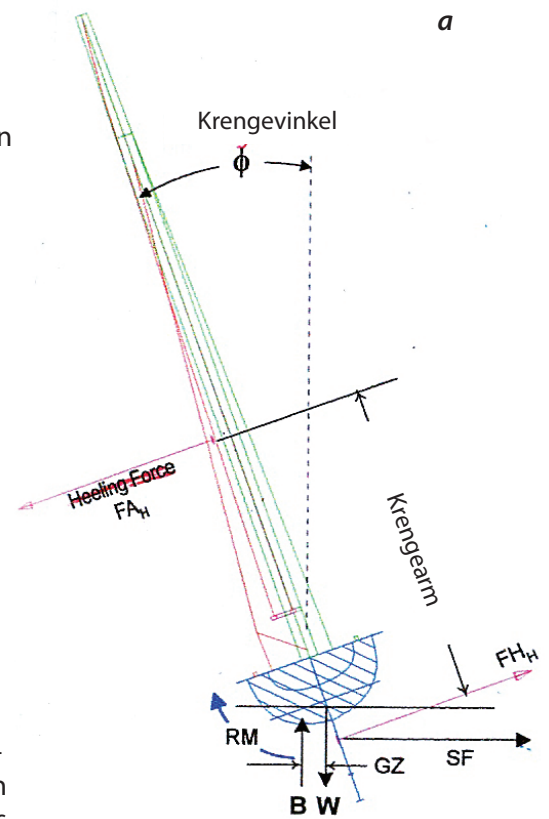
Figurene i marginen er omfattende, men de viser "bare" de forskjellige aerodynamiske og hydrodynamiske krefter, deres relative posisjoner og tilhørende momenter, inklusiv styremoment.

Figur neders forrige side viser koordinatsystem, med definisjon av retninger og akser for krefter. Figuren viser også det totale bilde av alle kraftkomponentene.

**Figur a** viser seilbåt sett fra akter. Den aerodynamiske krengekraftkomponent ( $FA_H$ ) er like stor men har motsatt retning av den hydrodynamiske kraftretning ( $FH_H$ ). Momentet fra disse ( $FA_H \cdot a$ ) gjør at båten legger seg over med en krengevingkel.

**Figur b** viser båt og seil sett ovenfra, med retning av horisontal komponent av den totale hydrodynamiske kraft på båt ( $FH_{TOT}$ ). Dette er en vektorsum av sidekraft og motstand. For at likevekt skal opprettholdes, må den totale aerodynamiske kraft ( $FA_{TOT}$ ) være i størrelsesorden lik og ha motsatt retning av  $FH_{TOT}$ .

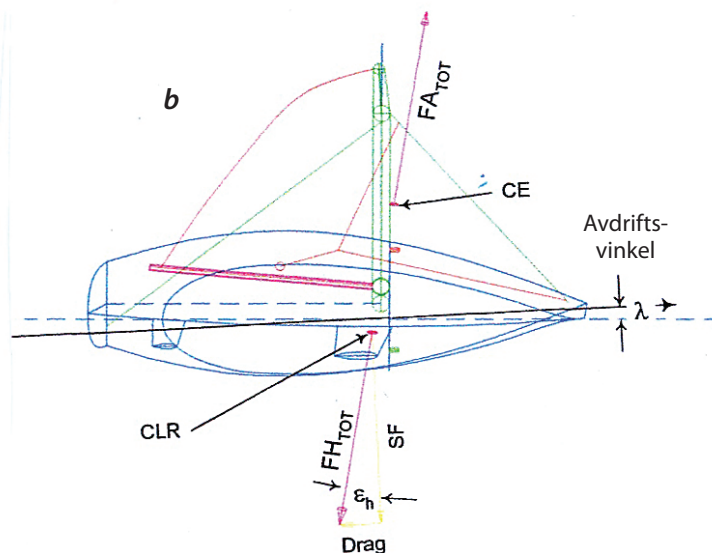
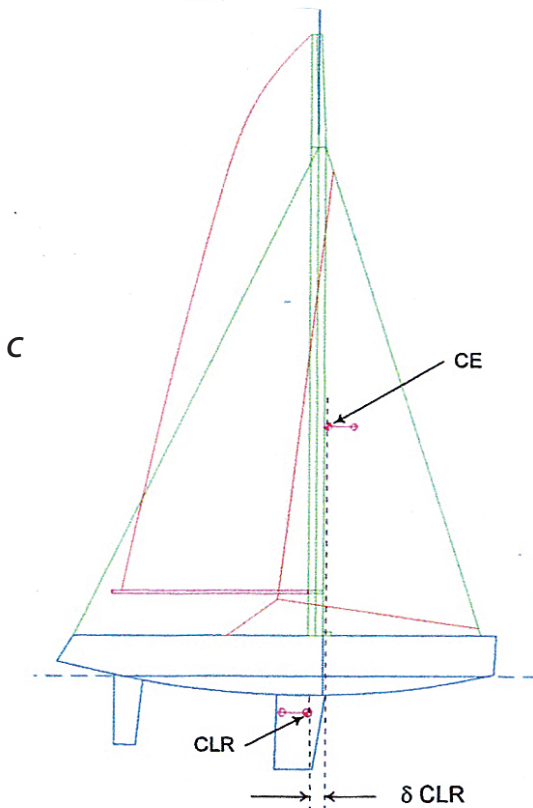
**Figur c** viser seilbåten sett fra siden. Angrepspunkt for den totale hydrodynamiske sidekraft (CLR, funnet for eksempel ved modellforsøk) og beregnet angrepspunkt for seilplanets aerodynamiske sidekraft (CE) vises i denne figuren. CE ligger klart foran CLR, men figurene a og b viser seilbåten med kraftlikevekt. Dette vil si at resultatmomentet av kreftene i CE og CLR er kompensert med moment fra rorkraft.

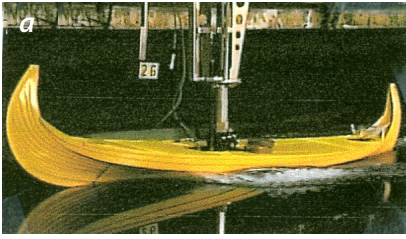


**Krefter, angrepspunkter og momenter som virker på en seilbåt.**

- a. Seilbåten sett fra akter
- b. Sett ovenfra
- c. Sett fra siden

$FA_{TOT}$  = total aerodynamisk kraft  
 $FA_H$  = hydrodynamisk krengekraft  
 $FH_{TOT}$  = total hydrodynamisk kraft  
 $FH_H$  = hydrodynamisk krengekraft  
 $SF$  = sidekraft  
 $CLR$  = senter for sideveis motstand  
 $W$  = båtens tyngde  
 $B$  = oppdriftskraft  
 $RM$  = rettede moment  
 $CE$  = senter for seilkraft





## Modellprøving av Osebergskipet

**Prøving uten krengeving og avdrift.** Osebergskipets seilegenskaper i stille vann med hastigheter opptil 20 knop ble testet i 2009 ved bruk av nyeste type avansert seilbåtdynamometer. Forsøksoppstilling og resultater er vist i figurer til venstre.

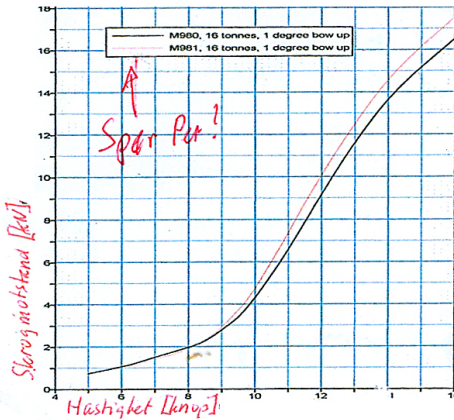
**Prøving under krengeving og avdrift.** Skrogsnotstanden ble også målt når modellen var montert med forskjellige krengevinger og avdriftsvinkler. Et bilde fra slike prøver er vist på neste side. Det vil føre for langt å komme nærmere inn på disse resultatene.

## Beregninger av skipets hastigheter under seil ved ulike vindhastigheter og realistiske krengevinger og avdrifter.

Det eksisterer dataprogrammer som kombinerer de hydrodynamiske egenskapene som er kartlagt gjennom de ovennevnte prøvene og aerodynamiske egenskaper for riggen. De nødvendige aerodynamiske data for Oseberg-riggen ble bestemt fra en rekke eksperimentelle data fra utenlandske vindtunneltester av lignende konfigurasjoner. Alt dette ble brukt i det nevnte dataprogrammet, og resultatene av beregningene er vist i polarplottet nedenfor. I beregningene ble det korrigert for vindmotstand for både båt og rigg.

Polarplottet viser skipets hastighetshurver ved forskjellige vindhastigheter og med mannskapet som, flyttbar ballast. Med mannskapet plassert i lo (mot vinden), øker fartøyets stabilitet og dermed hastighet. Bruk av polarplottet framgår av eksempler på neste side.

b



**Modellprøving av Osebergskipet i skala 1:10, utført av MARINTEK i skipsmodelltank ved Marinteknisk Senter i 2009.**

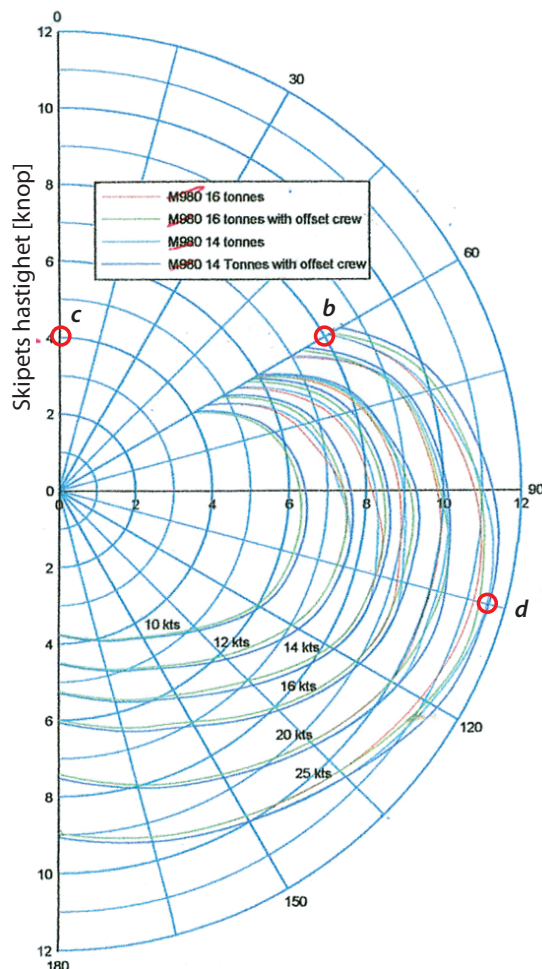
a. Forsøksoppstilling med modellen festet til slepevogn. Bildet ble tatt under 20 knops fart i stille vann og uten krengeving og avdrift.

b. Resultater fra prøvene. Grafen viser skrogsnotstand som funksjon av hastighet. Skroget er utstyrt med kjøl, ror, finner, m.m.

Verdiene gjelder for seiling uten krengeving og avdrift

## Seilingshastigheter for Osebergskipet vist som polarplott.

Skipets hastighet ved forskjellige vindhastigheter og vindretninger, Deplasement: 14 og 16 tonn, mannskap som flyttbar ballast.

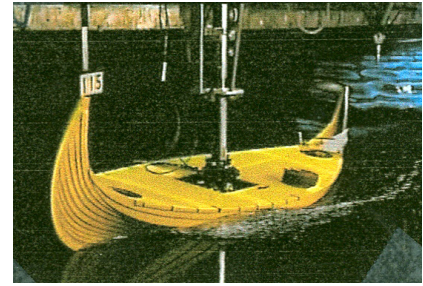


Skipets hastighet ved ulike vindhastigheter og vindretninger avleses på de radielle aksene. Vindretningen defineres som 0° ved motvind og 180° ved vind rett aktenfra.



**Eksempel.** Basert på resultatene fra hastighetsprøvene for Osebergskipet skal følgende størrelser bestemmes ved seiling i 25 knops vind, med deplasement 16 tonn og mannskapet plassert mot le

- Skipets hastighet ved full medvind
- Skiets hastighet ved vind 60° imot.
- Skipets effektive hastighet mot vinden ved vind 60° imot
- Maksimal hastighet som skipet kan oppnå, og den vindretning som da gjelder.
- Froudes tall ved maksimal hastighet. Marker denne tilstanden i diagrammet på side 3-19 og kommenter beliggenheten. Hvordan defineres hurtiggående fartøy ifølge figuren nederst på side 3-18?
- Den motstand i kN som skipet har ved maksimal hastighet og den tilhørende motstandseffekt



*Motstandsprøve med Osebergskipet i 12 knops fart og med realistisk avdriftsvinkel og krenging*

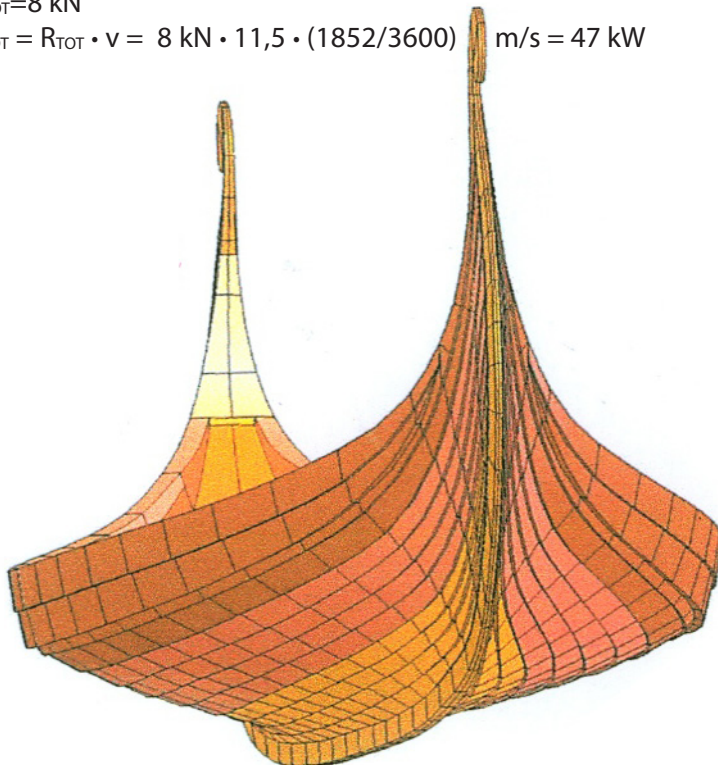
**Løsninger** finnes ved avlesninger i aktuelle punkter (ca-verdier):

- 9 knop,
  - 8 knop,
  - 4 knop,
  - 11,5 knop, 15° aktenfor tvers
- e)  $F_n = v / (\sqrt{g \cdot L}) = 11,5 \cdot (1852/3600) / (9,8 \cdot 21,5) = 0,41$

Ved markering av denne tilstanden i figur side 3-18 ser vi at Gokstadskipet ved maksimal hastighet ligger på grensen til området for hurtiggående skip. I følge definisjon i tabellen på side 3-18 settes grensen ved  $F_n=0,4-0,5$ . Vi kan derfor si at vikingene klarte å bygge hurtiggående båter allerede for 1200 år siden.

- f)  $R_{TOT}=8 \text{ kN}$

$$P_{TOT} = R_{TOT} \cdot v = 8 \text{ kN} \cdot 11,5 \cdot (1852/3600) \text{ m/s} = 47 \text{ kW}$$



**Osebergskipet, med sine utrolig flotte linjer og former, ble bygget i tiden 800-850**

Både dette skipet og de andre vikingskipene representerte teknologisk utvikling innen datidens skipsbygging. Både design, linjer, former og tekniske detaljer tydet på teknologisk overlegenhet i forhold til annen skipsbygging i verden på den tiden, med store kunnskaper om hydrodynamikk og styrkemessige forhold. Samtidig hadde skipet også fått en forbausende fin kunstnerisk utsmykning.

**Tekniske data:**

Lengde: 21,5 m, total bredde: 5,1 m  
Deplasement: 16 tonn

Skipet kunne både ros (med 15 par årer (30 roere) og seiles (med opptil 11,5 knops fart, se eksempel på forrige side). Les mer om vikingtiden på side 9-5

**Undringsoppgave:**

Hvor stor fartsgevinst ville Osebergskipet oppnådd hvis mannskapet flyttet seg fra le opp mot lo side under seiling med samme vind og 14 tonn deplasement? Hvorfor oppnås det en fartsgevinst i det hele tatt?





# Oppgaver

## Oppgave 3.1

Les på nytt side 3-3. Lag en figur med båten som slepes og slepebåten. Den sistnevnte båten drives med utenbordsmotor og slepet forutsettes å skje med konstant hastighet. Oppgaven går ut på å tegne inn de ytre krefter som virker på båtene. Betrakt hver av båtene som egne enheter som inkludere personene om bord. Kraftene er enten vertikale eller horisontale. Bruk de vanlige regler for hvordan krefter skal symboliseres når det gjelder retning, angrepspunkt og størrelse. Bruk videre en skala for horisontale krefter og en annen skala for de vertikale kreftene.

- Tegn inn alle ytre krefter som virker på den båten som slepes.
- Tegn inn alle ytre krefter som virker på slepebåten
- Etabler flest mulig ligninger mellom kreftene

## Oppgave 3.2

Hvor stor er friksjonsmotstanden for ei kule med diameter 1,0 m som dras med en hastighet lik 1,0 m/s i ferskvann. Kula beveger seg så langt nede i vannet at det ikke danner seg bølger på overflaten. Fra graf øverst på side 3-9 antas et friksjonsmotstandstall lik 0,13

## Oppgave 3.3

Vi skal bestemme effektbehovet for de norske undervannsbåtene av Ula-klassen når disse går med full fart, som er 23 knop. En slik båt har en lengde lik 59 m. og dimensjoner for øvrig som gjør at dens overflate grovt tilnærmet kan beskrives av følgende geometriske legemer:

- Halvkule med diameter 5,0 m (baugen)
- Sylinder med diameter 5,0 m og lengde 25 m (skrogparti fram til tårnet)
- Rett avkortet kjegle hvor diameteren avtar fra 5,0 m til 1,0 m på en lengde lik 31 m
- Halvkule med diameter 1,0 m (akterenden)
- Sylinder med høyde 6,0 m og ellipseformet. Tverrsnitt med diameterer lik 12 m og 3,0 m (tårnet)

Beregn ved full fart:

- Våt overflate for en slik undervannsbåt
- Reynolds tall og Froudes tall
- Friksjonsmotstandstall basert på ITTC erfaringsformel
- Friksjonsmotstanden
- Nødvendig skyvekrafteffekt
- Effektbehov på framdriftsmotoren (elektromotoren), forutsatt virkningsgrader for propell lik 0,70 og for kraftoverføringen lik 0,95

## Oppgave 3.4

En modell av et 200 m langt skip er utført med en lengde lik 6,0 m. Det testes i en slepe-tank med en hastighet 1,6 m/s. Det måles en slepekraft på 20 N. Modellen har en våt overflate lik  $4,05 \text{ m}^2$ . Beregn for fullskalaskipet tilhørende:

- Hastighet
- Total motstand
- Slepeeffekt

## Oppgave 3.5

For en katamaran gjelder følgende spesifikasjoner:

- Lengde: 40 m
- Total bredde: 10,1 m
- Dypgående: 1,46 m
- Bredde på hvert delskrog: 2,7 m.
- Fart 36 knop
- To hovedmotorer

For fartøyet skal totalmotstand og nødvendig levert effekt fra hovedmotorene ved full fart 36 knop). Dette gjøres ved å følge prosedyren nedenfor:

- Beregn Reynolds tall og Froudes tall
- Beregn friksjonsmotstandstallet etter ITTC formel
- Bestem bølgeomotstandstallet fra graf for katamaraner på side 3-20
- Beregn våt overflate (ta ikke hensyn til "spissing" på skrogene)
- Beregn totalmotstanden
- Bestem nødvendig motoreffekt for begge motorene samlet. Bruk 0,7 og 0,95 som virkningsgrader for propellen og kraftoverføringen.

**Oppgave 3.6**

Geir står på vannski, som er 1,2 m lange og 0,2 m brede og har en masse på 10 kg til sammen. Geir selv har en masse på 53 kg. Det vises til figur av planende fartøy på side 3-21. Også for Geir vil det bygge seg opp trykk under vannskiene med en trykkfordeling omtrent som vist. Hastigheten er konstant 14 knop. Skiene danner en vinkel på 6 gr. med horisontalen.

- Lag en figur som viser alle ytre krefter som virker på en av vannskiene
- Beregn vått areal når det antas at 75% av skilengden er effektiv under fart (inkludert bølgedannelsen, se figuren)
- Beregn alle ytre krefter. Bruk herunder
- ITTC-formel for beregning av friksjonskraften. Innflytelsen av trimvinkelen på friksjonskraften og trykkkraften er så liten at vi kan anta at de virker horisontalt og vertikalt.
- Beregn midlere trykk under skiene og hvor stor andel i prosent dette utgjør av stagnasjonstrykket. Denne andelen må være mindre enn ca 50% av stagnasjonstrykket for at det skal være mulig å bevege seg på denne måten

**Oppgave 3.7**

- I oppgave 3.3 er blitt bestemt nødvendig effekt på elektromotoren som skal drive undervannsbåten. Beregn hvor stort dreiemoment motoren må gi hvis turtallet er 1800 o/min. Turtallet på propellene antas å være 300 o/min. Hvor stor utveksling på giret mellom elektromotor og propell da ha?

**Oppgave 3.8**

På side 3-27 er det vist til et dataprogram som kan brukes til dimensjonering av propeller. Programmet baseres på tre dimensjonsløse grupper av størrelser. Vis at

- skyvekrafttallet
- dreiemomenttallet
- framgangstallet er dimensjonsløse

**Oppgave 3.9**

På side 3-18 er totalmotstanden for et skip med deplasement  $100000 \text{ m}^3$  beregnet til 1400 kN når skipets hastighet er 18 knop. Bestem en passende propell til dette skipet ved å følge den prosedyren som er beskrevet på side 3-29. Som utgangspunkt velges en firebladet propell med et turtall på 105 o/min.

**Oppgave 3.10**

Det vises til figur om Geirs pulsvannjetsystem beskrevet på side 3-32. Vi forutsetter at Geir arbeider på følgende måte:

- Bøtta fylles med 6 kg vann hver gang
- Utført arbeid på vannet under akselerasjonsperioden er 100 J. Dette er ca 20% av det arbeid en topprent kulestøter gjør under støtet,
- Arbeidsprosessenes hyppighet er 20 ganger pr.mi

Beregn:

- Vannets hastighet når det forlater bøtta
- Midlere kraft som Geir bruker på vannet (F) under arbeidsprosessen, som skjer på en strekning lik 1,1 m.
- Midlere skyvekraft på flåten (T) under arbeidsprosessen
- En tenkt, kontinuerlig skyvekraft ved å regne ut en middelvei basert på at  $T = 0$  mens bøtta fylles igjen med vann og bringes i startposisjon for neste akselerasjonsperiode



