

Introduksjon til Marinteknikk - MAS124

Forelesningsnotater

Gloria Stenfelt

gste@hvl.no



Innholdsfortegnelse med nøkkelord

Viktige definisjoner

- deplasement, koordinatsystem, formkoeffisienter, linjetegninger

Hydrostatikk

- tetthet, trykk, volum, Arkimedes lov, når gjelder Arkimedes?

Skipets geometriske punkter

- tyngdepunkt, oppdriftssenter, flotasjonssenter, tyngdepunktsatsen, likevekt
- metasenterhøyde, hydrostatiske $\overline{KB}$ -, $\overline{KM}$ -, $\overline{KG}$ -kurver

Initialstabilitet

- stabilitet små krengevinkler, likevekt, vekt og formstabilitet

Beregning metasenterhøyde

- $\overline{KB}$, $\overline{BM}$, Steiners sats, arealtregningsmoment (2. ordens moment)
- $\overline{KG}$ og virtuell tyngdepunktheving $\overline{GG'}$
- Fylling og lensing av bunntanker

Krenge- og trimvinkel

- usymmetrisk last, flytting/fjerning/tilføring last, minste fribord, lastelinjekonvensjonen

Tungløft

- Fritt hengende last, kranoperasjoner, likevekt

Numerisk integrasjon

- $\overline{GM}$ beregning kurvete geometrier, Simpson – og Trapez metode

Krengeprøve

- historikk, beregninger se NTNU notater

Store krengevinkler

- M- kurve, B- kurve, $\overline{GZ}$ -kurve, $\overline{KY}$ -kurve,

Stabilitetskriterier

- krav på initialstabilitet, $\overline{GZ}$ -kurvens forløp og arbeid, $\overline{KG}$ -grensekurve
- se *Stabilitetskriterier.pdf*

Dynamisk stabilitet

- vindens påvirkning, lagret energi i GZ-kurve

Fullt neddykket legeme

- rettende arm, styring, hydrostatisk kraftbalanse

Skadestabilitet

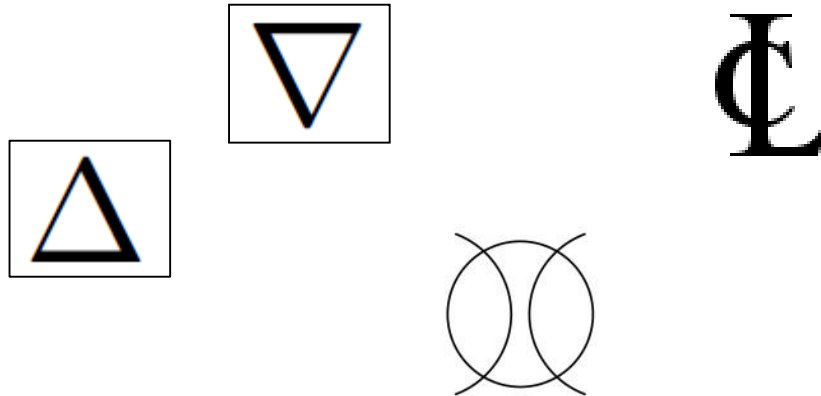
- angle of loll, grunnstøting ('beaching', dokking)
- vannfrylling, lost buoyancy method

Øvrige temaer

Referanser

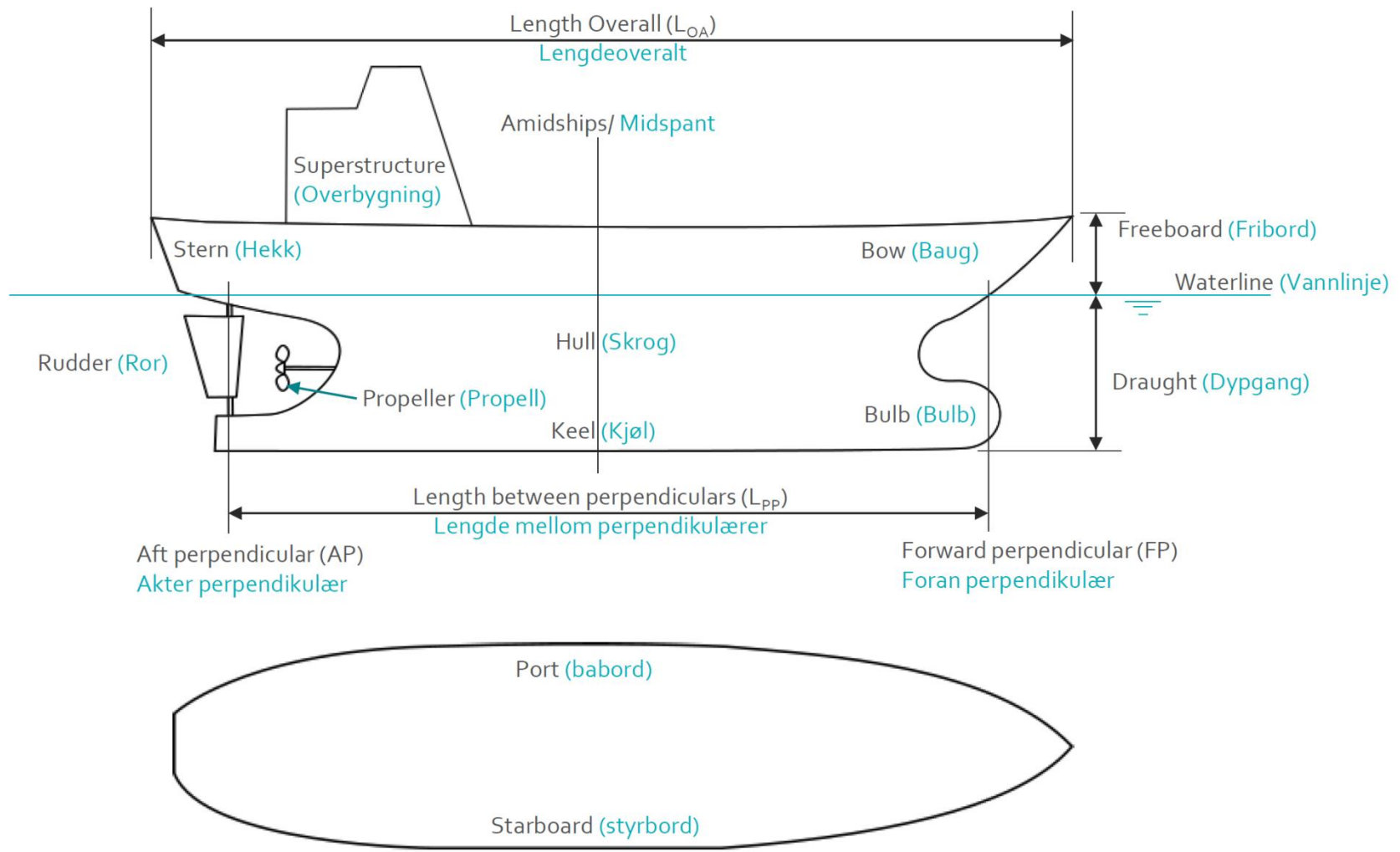
Viktige definisjoner

deplasement, koordinatsystem, formkoeffisienter, linjetegninger

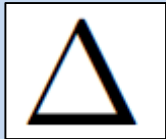


[Til innholdsfortegnelse](#)

Definisjoner skip



Deplasement



Vektdeplasement (Displacement mass)

Gresk: *capital Delta*

Enhet: [kg]

Skipets vekt.

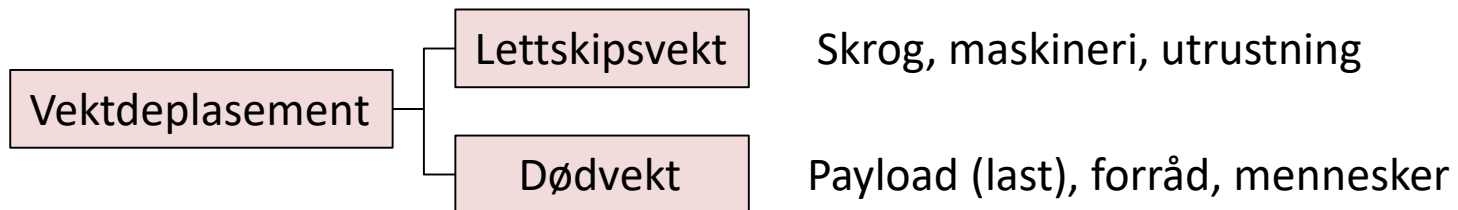


Volumdeplasement (Displacement volume)

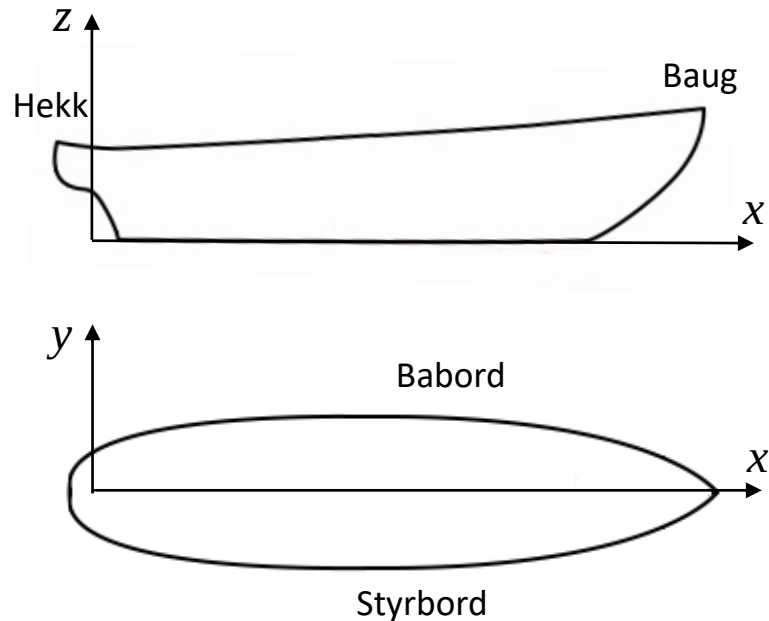
Gresk: *Nabla*

Enhet: [m³]

Neddykket volum, fortrent væskemengde.



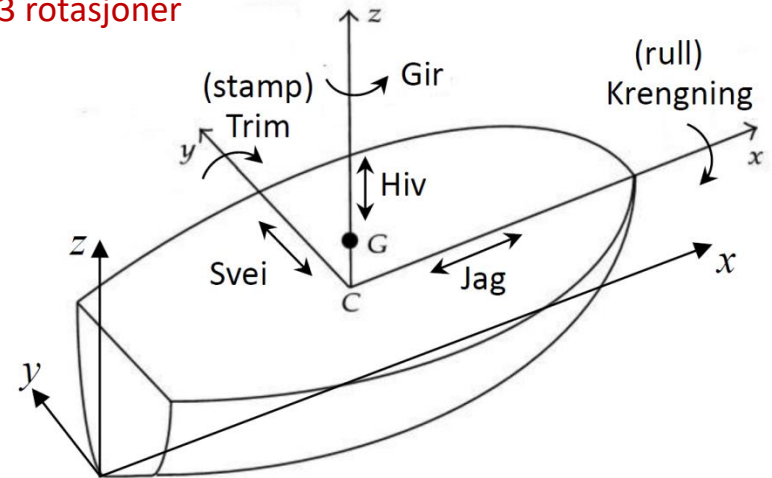
Koordinatsystem og frihetsgrader



Origo for koordinatsystemet er vanligvis definert ved roraksen i linje med kjølpunktet. Origo er referansepunktet for hele skipets geometri, last og tyngdepunkts plassering, x_G , y_G , z_G . Når tyngdepunktet, G , er bestemt og man begynner med dynamisk analyse er det vanlig at flytte frem koordinatsystemet sånn at skipets rotasjonspunkt, C , er på samme vertikale akse som origo for det nye koordinatsystemet.

6 frihetsgrader (dof - degrees of freedom)

- 3 translasjoner
- 3 rotasjoner

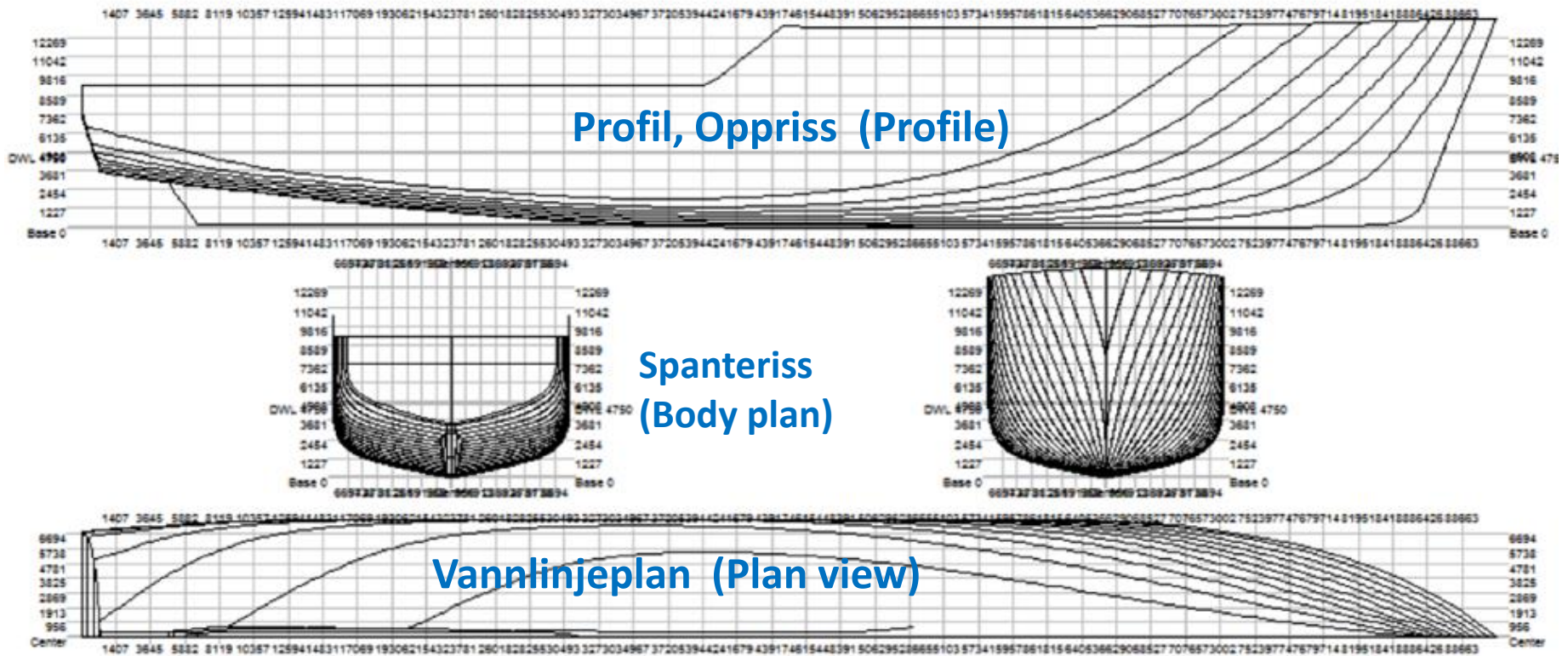


Positive moment rundt akslene gir positive vinkler (høyre hånd regel) :



Krengvinkel: ϕ (gresk: phi), positiv styrbord
Trimvinkel: θ (gresk: theta), positiv baug ned
Girvinkel: ψ (gresk: psi), positiv baug til venstre

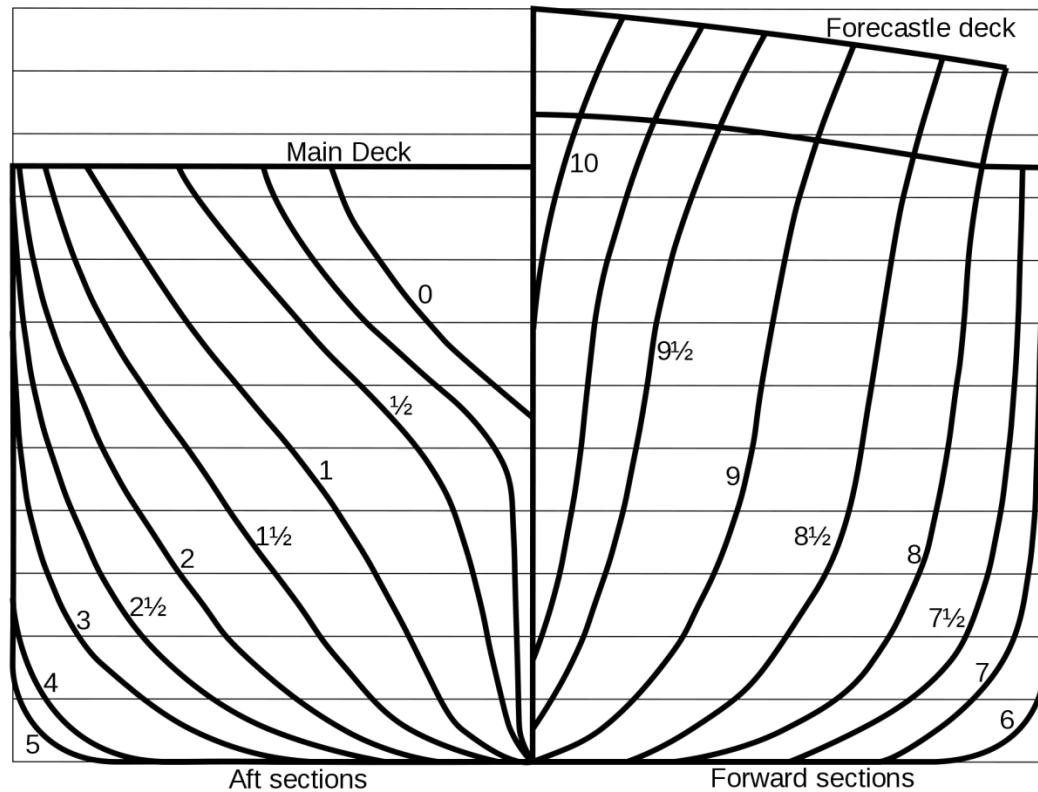
Linjetegninger



Lagd i *Freeship*

Linjetegninger

Spanteriss - Body plan



Formkoeffisienter

Beskriver skrogets fylldighet/slankhet.

1. Vannlinjeareal koeffisient (Waterplane coefficient)
2. Midspant koeffisient (Midship section coefficient)
3. Blokk koeffisient (Block coefficient)
4. Prismatiske koeffisienter (Vertical and longitudinal prismatic coeff.)

1. Vannlinjearealkoeffisient

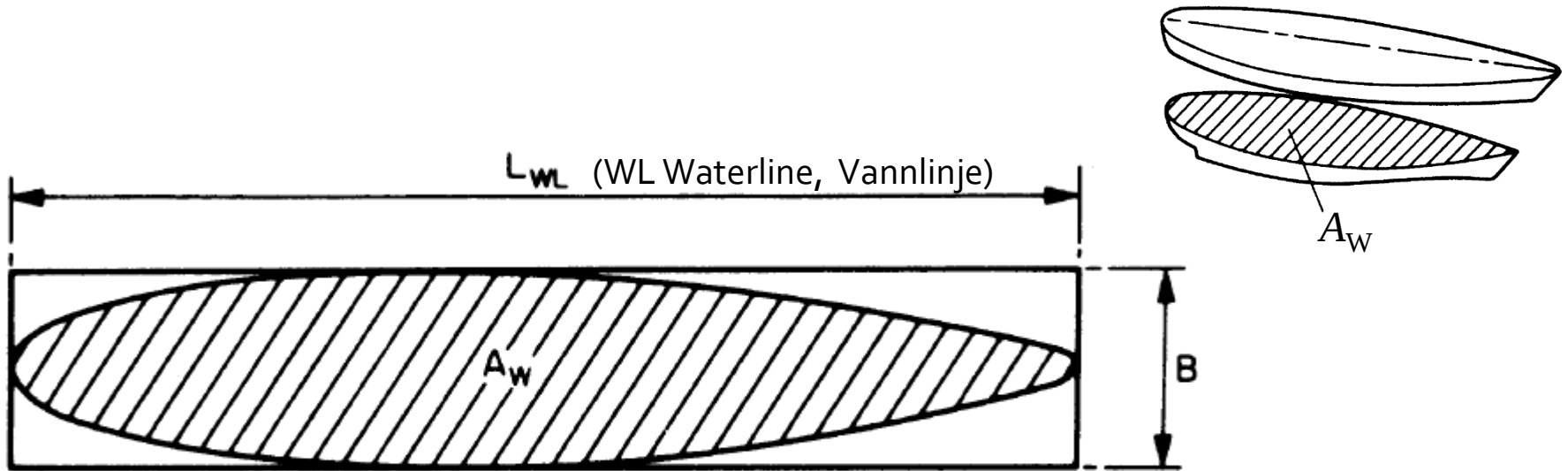
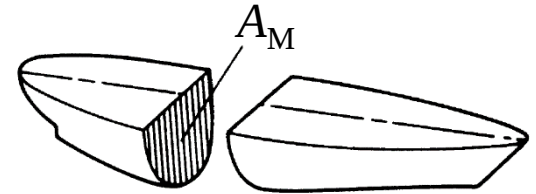
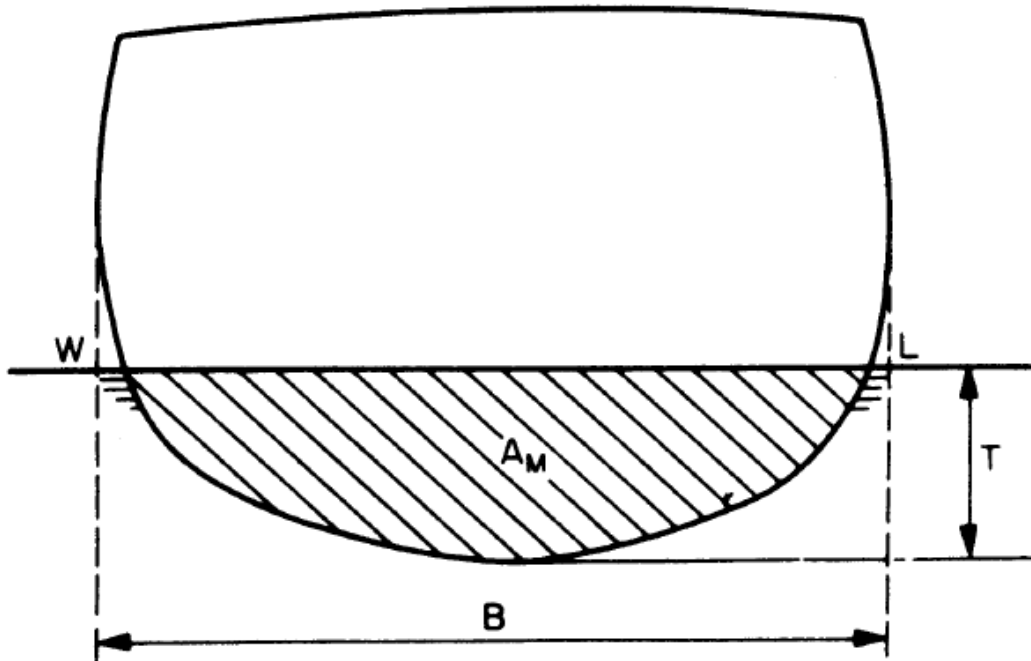


Fig. 2.9 Waterplane coefficient

$$C_{WP} = \frac{A_W}{L_{WL} B}$$

Typiske verdier:
0.7 - 0.9

2. Midspantkoeffisient



T Dypgang (Draught)

Fig. 2.10 Midship coefficient

$$C_M = \frac{A_M}{BT}$$

3. Blokk koeffisient

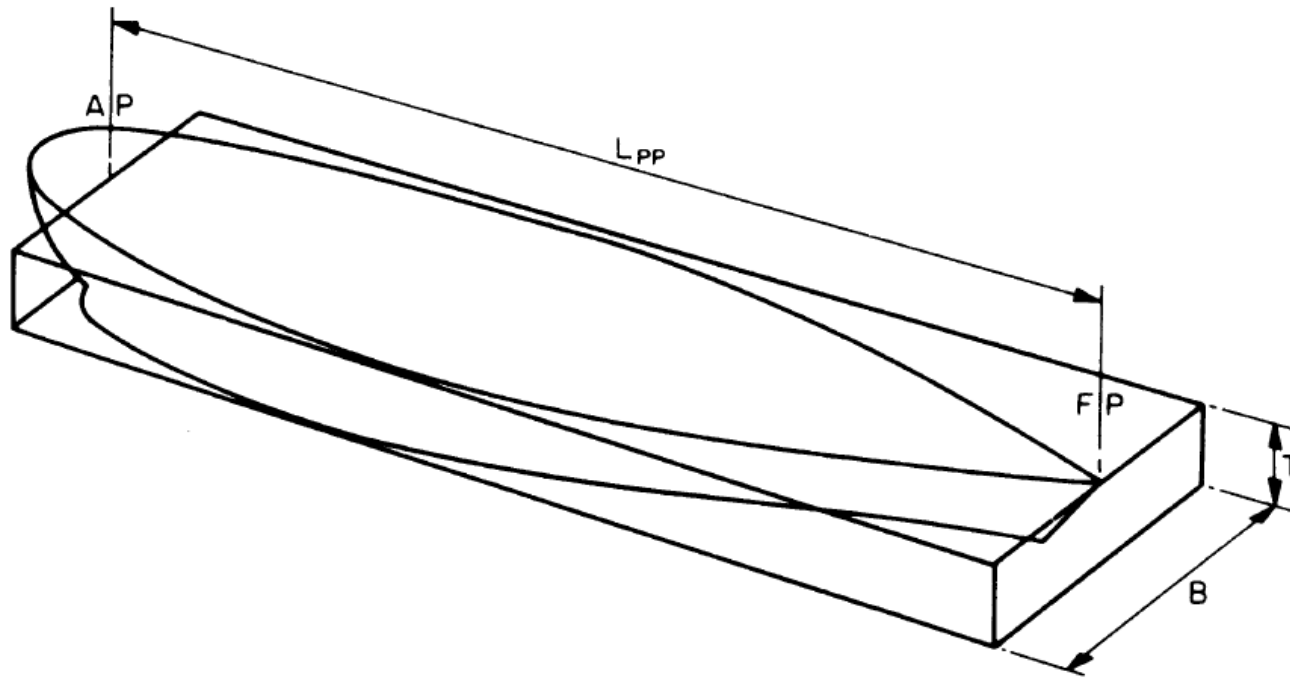
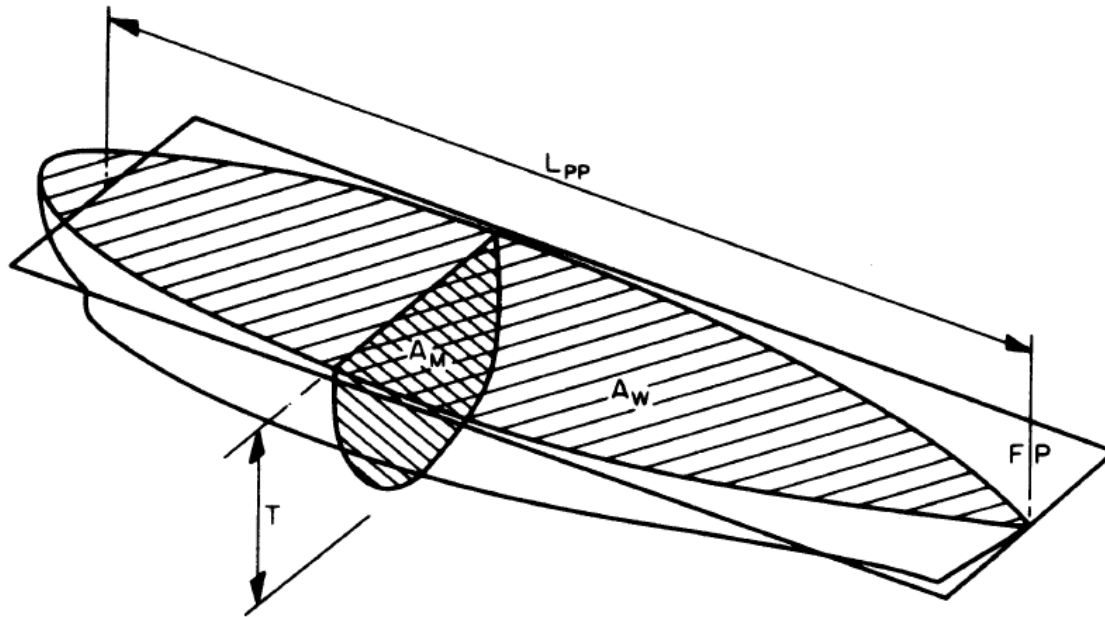


Fig. 2.11 Block coefficient

$$C_B = \frac{\nabla}{BTL_{PP}}$$

Typiske verdier:
0.88 tankfartøy
0.6 hangar fartøy
0.5 yacht

4. Prismatiske koeffisienter



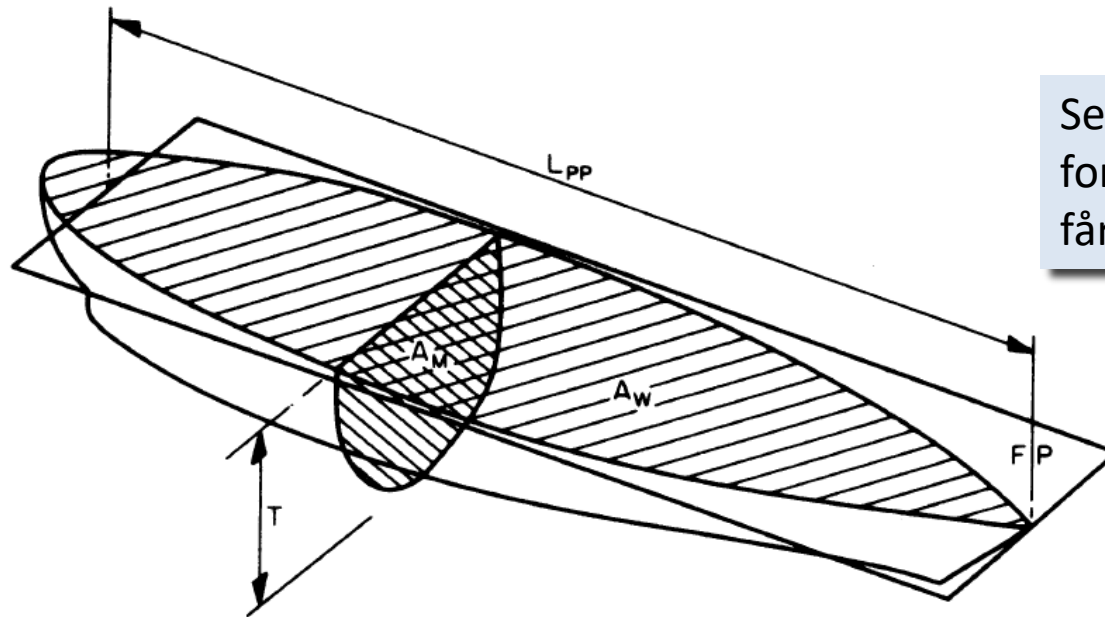
$$C_P = \frac{\nabla}{A_M L_{PP}}$$

Longitudinell

$$C_{VP} = \frac{\nabla}{A_W T}$$

Vertikal

4. Prismatiske koeffisienter



Setter man sammen
formel for C_M og C_P ,
får man at $C_P = C_B / C_M$

$$C_P = \frac{\nabla}{A_M L_{PP}}$$

Longitudinell

$$C_{VP} = \frac{\nabla}{A_W T}$$

Vertikal

Dimensjoner i riss



Alle formkoeffisienter beregnes på basis av dimensjoner i riss, dvs. innside hud eller utside spant.

Øvingsoppgave

Data for et fiskefartøy:

L_{WL}	Lengde vannlinje	14.251 m
B	Bredde midskip	4.520 m
T	Dypgang	1.908 m
∇	Volum deplasement	58.536 m ³
A_M	Midspantareal	6.855 m ²
A_W	Vannlinjeareal	47.595 m ²

Beregn C_{WP} , C_M , C_B , C_P og C_{VP} .

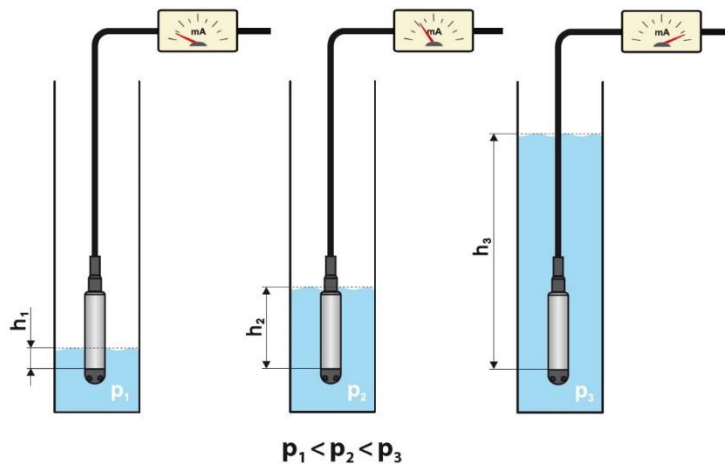
Resultat

C_{WP}	0.73889
C_M	0.79486
C_B	0.47628
C_P	0.59920
C_{VP}	0.64459

*Alt material for formkoeffisienter er fra:
Basic Ship Theory, Vol.1, s. 12-14 (Rawson and Tupper 1996)*

Hydrostatikk

tetthet, trykk, volum, Arkimedes lov, når gjelder Arkimedes?

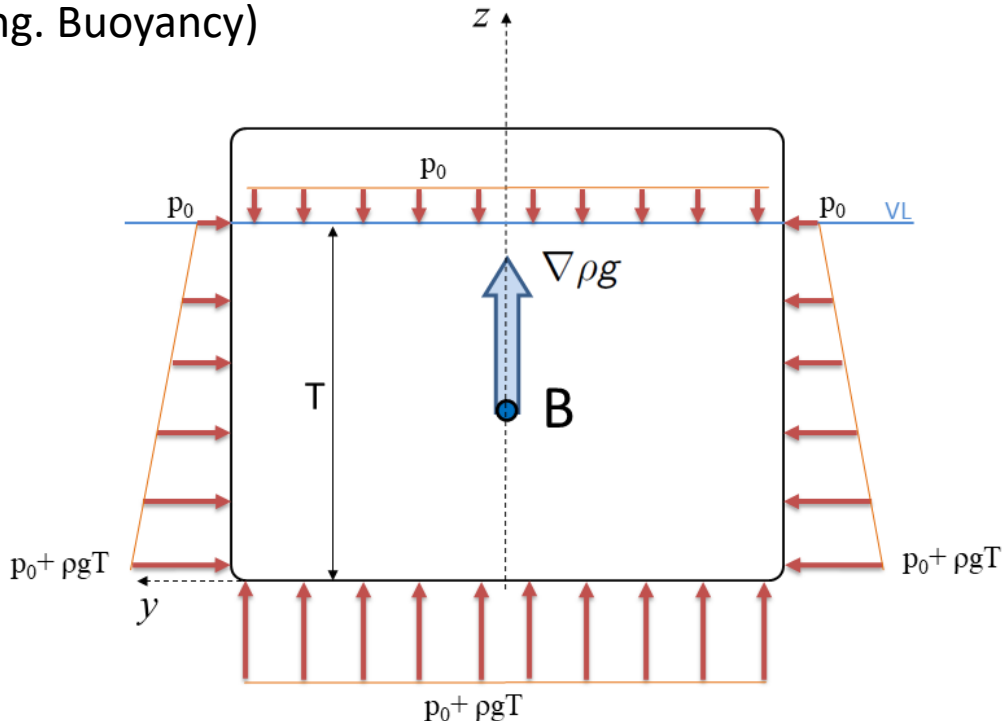


[Til innholdsfortegnelse](#)

Trykk på et legeme som flyter i vann

Hydrostatiske trykket virker normalt på ytre flater på et legeme og er like stort i alle retninger på samme dybde. Horisontalkomponentene virker likt mot hverandre slik at det ikke er noen sideveis kraft totalt. De vertikale trykkreftene er større på bunn enn topp av legemet, dette gir Oppdriften. Oppdriften har sitt angrepspunkt (B) i senter på neddykket volum.

(eng. Buoyancy)



Bunnareal enkel kasseform = A

$$\begin{aligned}\uparrow F_{\text{opp}} &= A(p_0 + \rho g T - p_0) \\ &= \rho g T A \\ &= \rho g \nabla \quad [\text{N}]\end{aligned}$$

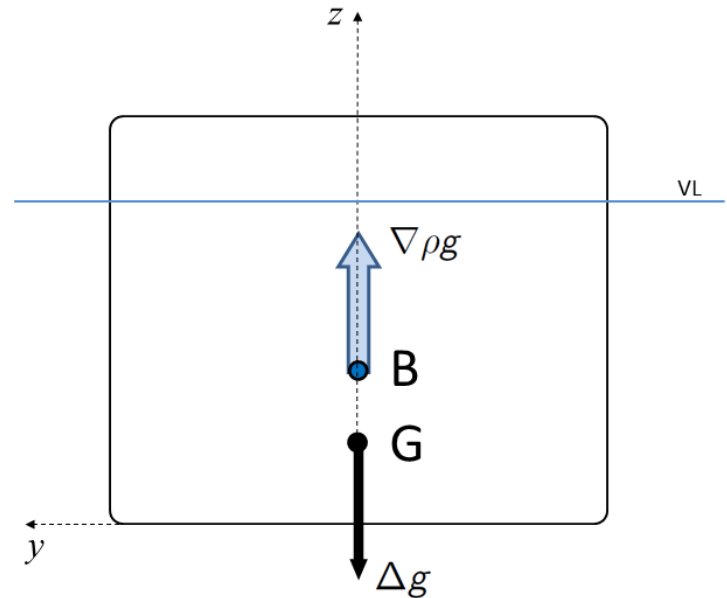
Denne utledning gjelder også generelt for alle neddykkede former... Arkimedes lov →

Arkimedes lov

Likevekt gir $\Delta g = \nabla \rho g$ [N]

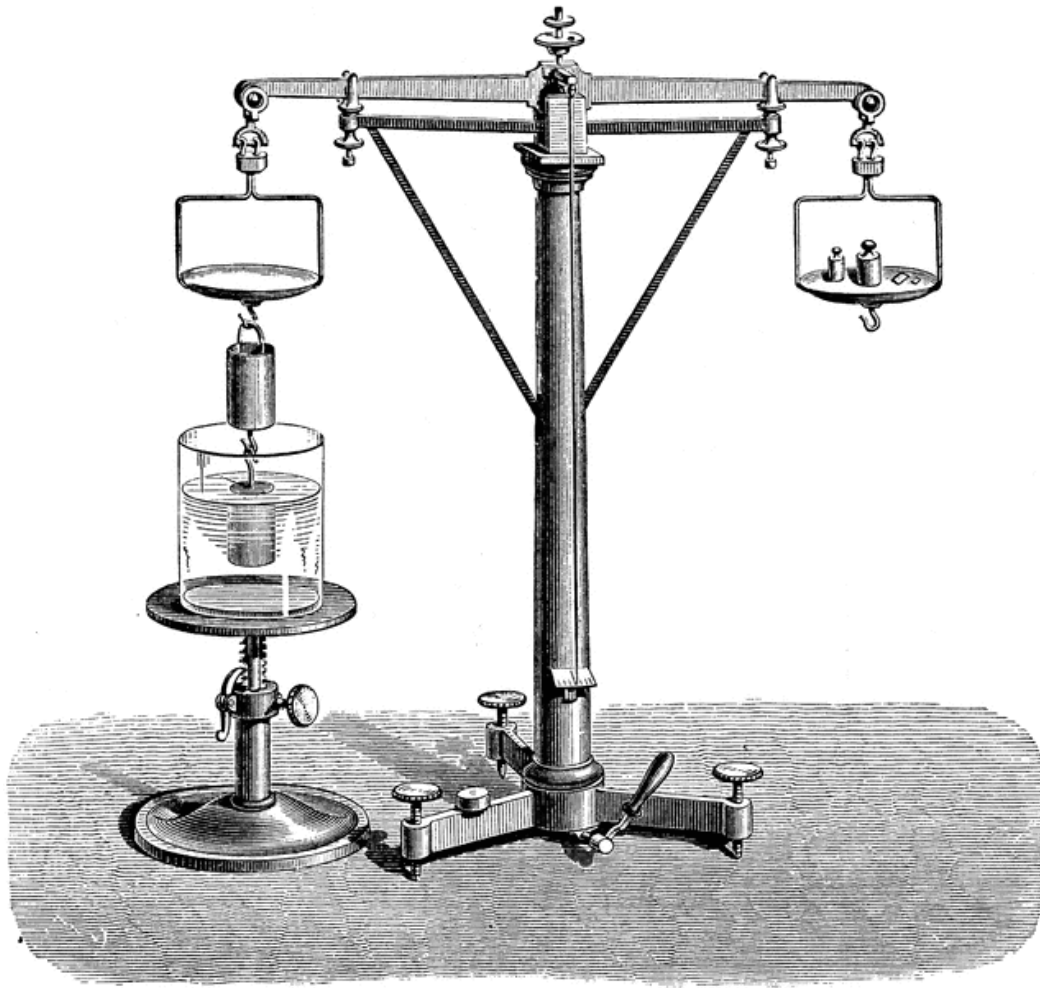
$$\Delta = \nabla \rho \quad [\text{kg}]$$

Δ (*Delta*) er legemets massedeplassment
 ∇ (*nabla*) er legemets volumdeplassement
 g er tyngdeakselerasjonen
 ρ er tettheten på væsken som fortrenges



“Et neddykket legeme får en oppdrift lik tyngden av den væskemengde legemet fortrenge.”

Arkimedes



Any floating object
displaces its own
weight of fluid.

Når gjelder Arkimedes lov?

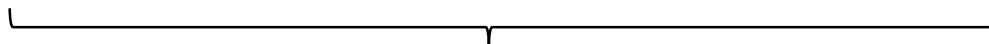
Utleddning på forelesning er basert på bok referanse:

A. Biran, *Ship Hydrostatics and Stability*, side 27-28

(finnes på Canvas)

Skipets geometriske punkter

tyngdepunkt, oppdriftssenter, flotasjonssenter, metasenter



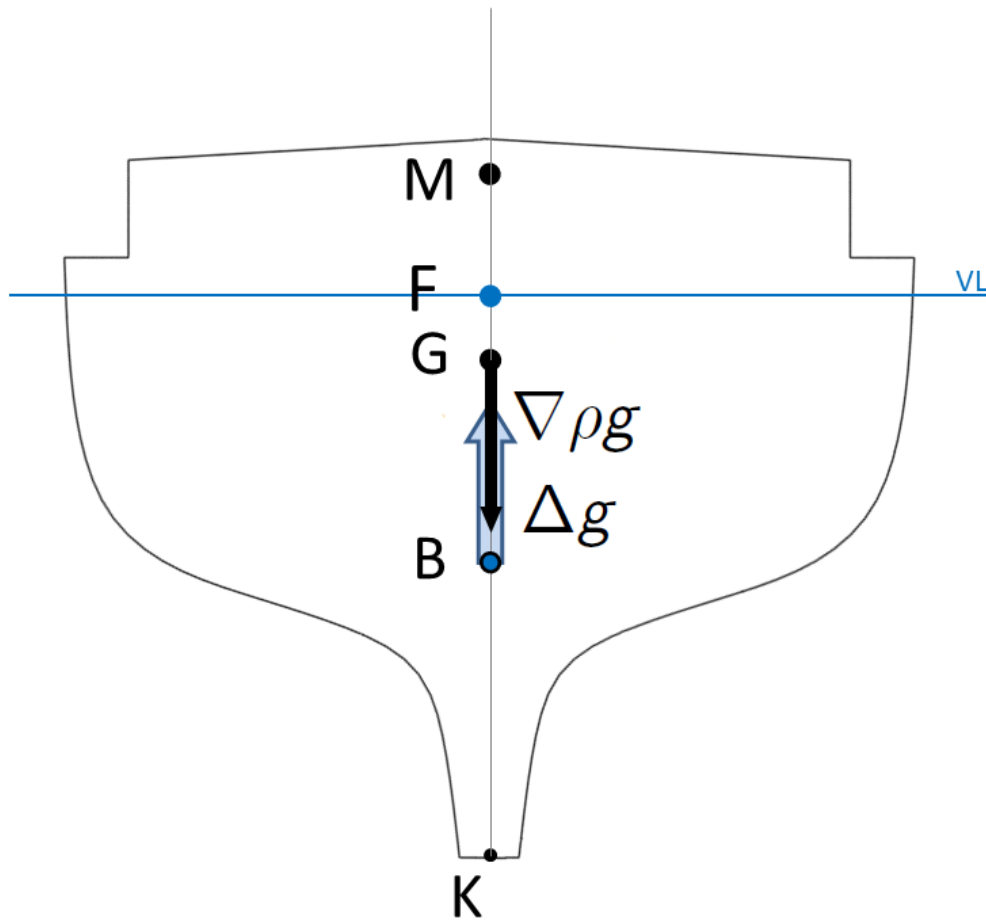
tyngdepunktsatsen

Oppdrift og tyngde vil være i likevekt

[Til innholdsfortegnelse](#)



Definisjon viktige punkter



Typisk plassering av:

Metasenter (M)

Flotasjonssenter (F)

Tyngdepunkt (G)

Oppdriftssenter (B)

Kjøl (K)

Samt angrepspunkter
for oppdrift og tyngde
i **likevekt**.

Bruk av tyngdepunktsatsen

Vi trenger å bruke tyngdepunktsatsen for å regne ut plasseringen av disse:

G = Tyngdepunkt = Massesenter til legeme

B = Oppdriftssenter = Volumsenter av neddykket legeme

F = Flotasjonssenter = Arealsenter av vannlinjearealet

Disse punkter har posisjon i skipets koordinatsystem:

$$G = [x_G, y_G, z_G]$$

$$B = [x_B, y_B, z_B]$$

$$F = [x_F, y_F, z_F] \quad z_F = T, \text{ (ligger i vannlinjeplanet)}$$

Tyngdepunkt – Massesenter - G

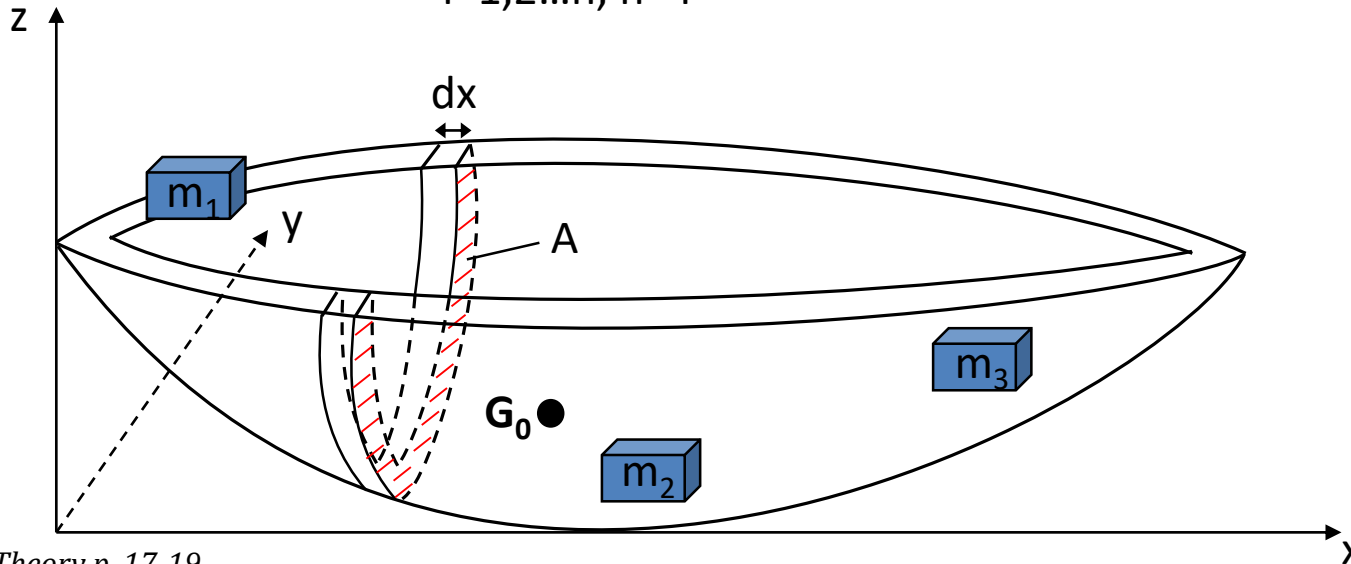
$$x_G = \frac{\int_0^L x A dx + \sum_{i=1}^n m_i x_i}{\int_0^L A dx + \sum_{i=1}^n m_i} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i x_i}{\sum_{i=1}^n m_i} = \frac{\text{Summen av (alle masser * avstand til senter på hver masse)}}{\text{Summen av alle masser (=Vektdeplasement } \Delta)}$$

Lettskips
tyngdepunkt

Tilført
dødvekt

Med lettskips
tyngdepunkt inkludert (G_0 er ofte gitt)

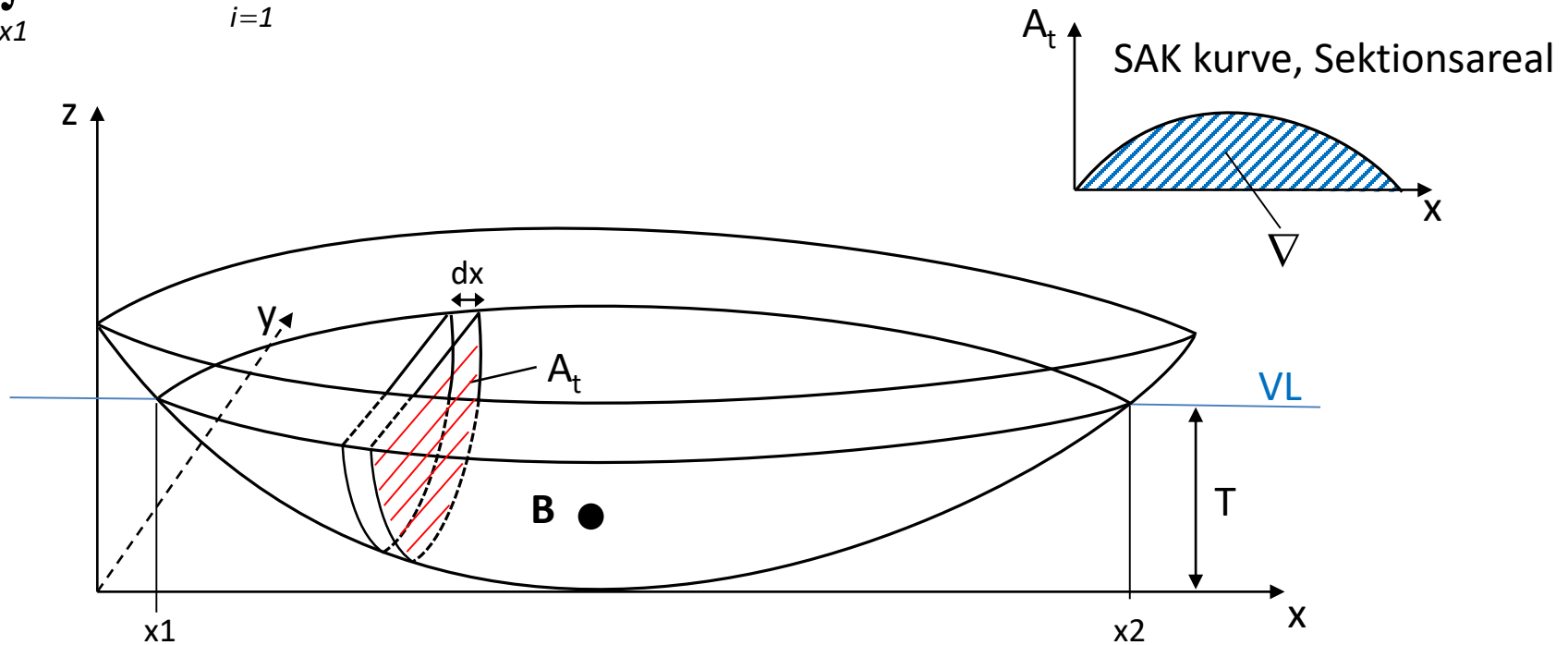
→ $i=1,2,\dots,n$, $n=4$



Ref: Basic Ship Theory p. 17-19

Volumsenter – Oppdriftsenter – B (1)

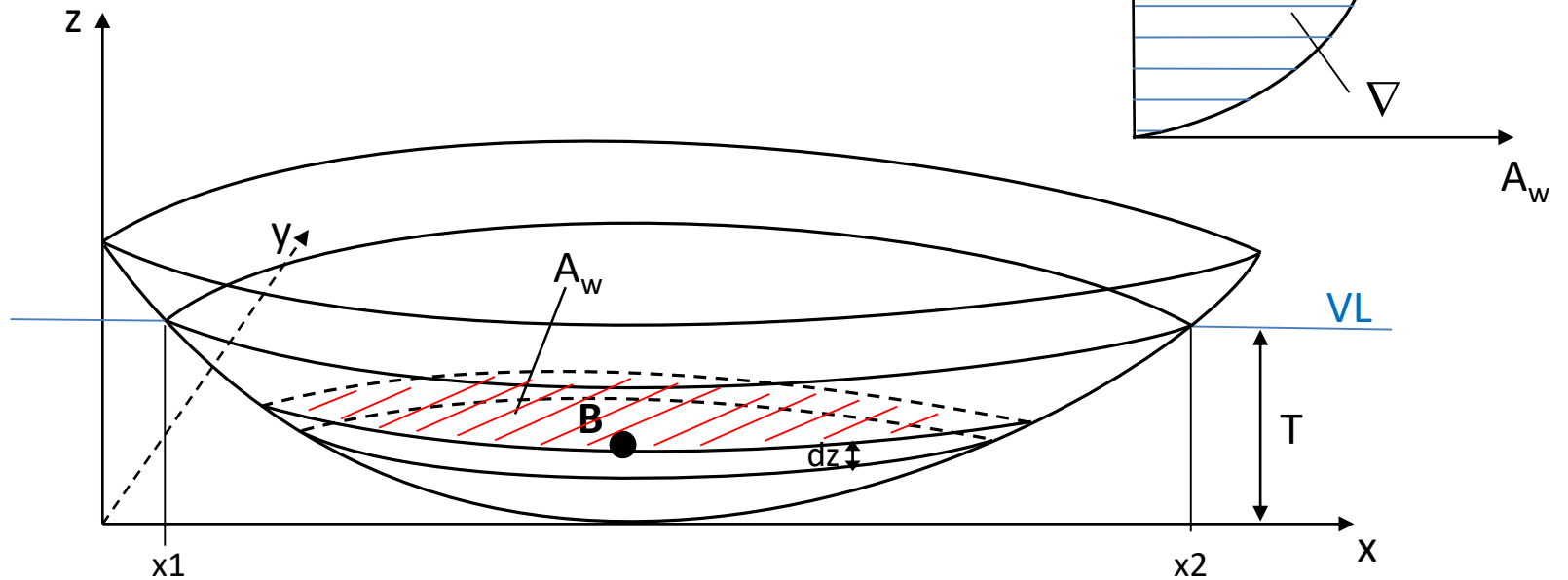
$$x_B = \frac{\int_{x1}^{x2} x A_t dx}{\int_{x1}^{x2} A_t dx} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i x_i}{\sum_{i=1}^n V_i} = \frac{\text{Summen av (alle neddykkede volumer} \cdot \text{avstand til senter på hver volum)}}{\text{Summen av alle neddykkede volumer (Volumdeplasement } \nabla \text{)}}$$



Ref: Basic Ship Theory p. 17-19

Volumsenter – Oppdriftsenter – B (2)

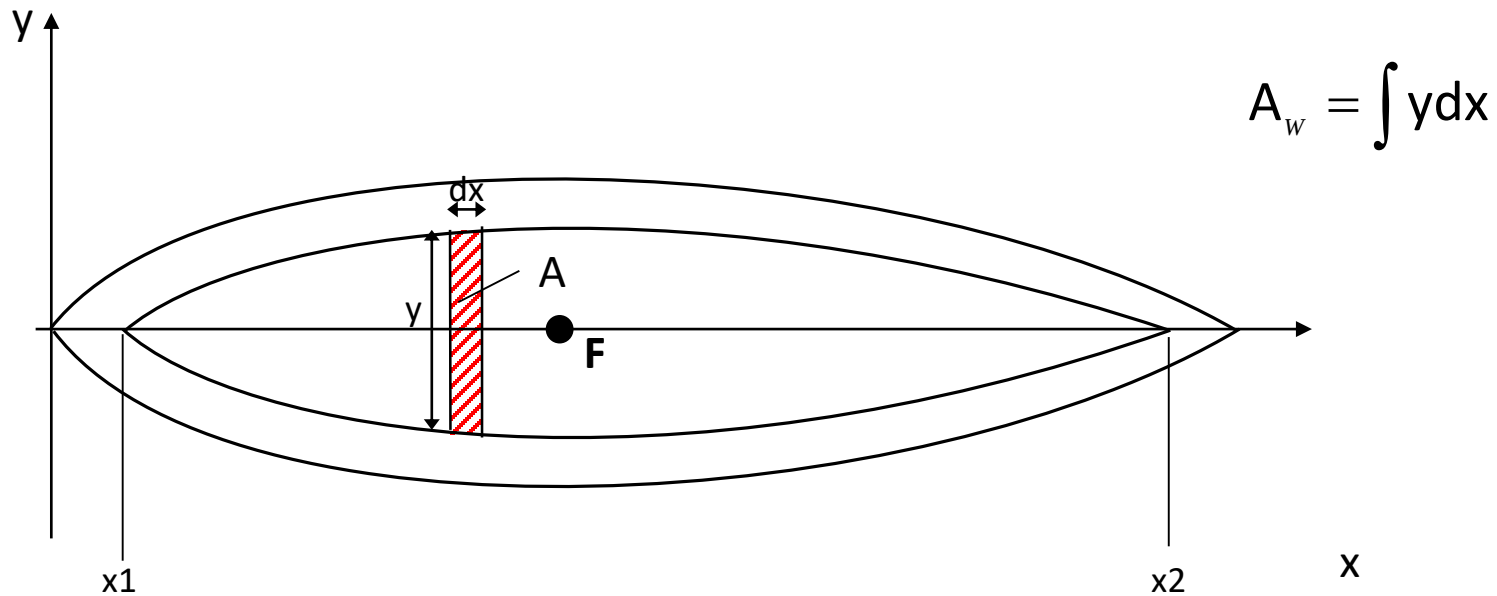
$$z_B = \frac{\int_0^T z A_w dz}{\int_0^T A_w dz} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i z_i}{\sum_{i=1}^n V_i} = \frac{\text{Summen av (alle neddykkede volumer} \cdot \text{avstand til senter på hver volum)}}{\text{Summen av alle volumer (Volumdeplasement } \nabla)}$$



Ref: Basic Ship Theory p. 17-19

Arealcenter – Flotasjonssenter – F

$$x_F = \frac{\int_{x1}^{x2} xy dx}{\int_{x1}^{x2} y dx} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i x_i}{\sum_{i=1}^n A_i} = \frac{\text{Summen av (alle arealdeler i vannlinjen} \cdot \text{avstand til senter på hvert areal)}}{\text{Summen av alle arealdeler i vannlinjen (Vannlinjeareal } A_w)}$$



Ref: Basic Ship Theory p. 14-16

Tyngdepunktsatsen (x-retning)

$$x_G = \frac{\sum_{i=1}^n m_i x_i}{\sum_{i=1}^n m_i} = \frac{\text{Summen av (alle masser} \cdot \text{avstand til senter på hver masse)}}{\text{Summen av alle masser (Vektdeplasement)}}$$

Homogent materiale som fortrenses, $m=V\rho$, tetthet forsvinner.

$$x_B = \frac{\sum_{i=1}^n V_i x_i}{\sum_{i=1}^n V_i} = \frac{\text{Summen av (alle neddykkede volumer} \cdot \text{avstand til senter på hver volum)}}{\text{Summen av alle volumer (Volumdeplasement)}}$$

Konstant tykkelse, $V=At$, tykkelse forsvinner.

$$x_F = \frac{\sum_{i=1}^n A_i x_i}{\sum_{i=1}^n A_i} = \frac{\text{Summen av (alle arealer i vannlinjeplan} \cdot \text{avstand til senter på hvert areal)}}{\text{Summen av alle arealer (Vannlinjeareal)}}$$

Tyngdepunktsatsen (y-retning)

$$y_G = \frac{\sum_{i=1}^n m_i y_i}{\sum_{i=1}^n m_i} = \frac{\text{Summen av (alle masser} \cdot \text{avstand til senter på hver masse)}}{\text{Summen av alle masser (Vektdeplasement)}}$$

↓ Homogent materiale som fortrenses, $m=V\rho$, tetthet forsvinner.

$$y_B = \frac{\sum_{i=1}^n V_i y_i}{\sum_{i=1}^n V_i} = \frac{\text{Summen av (alle neddykkede volumer} \cdot \text{avstand til senter på hver volum)}}{\text{Summen av alle volumer (Volumdeplasement)}}$$

↓ Konstant tykkelse, $V=At$, tykkelse forsvinner.

$$y_F = \frac{\sum_{i=1}^n A_i y_i}{\sum_{i=1}^n A_i} = \frac{\text{Summen av (alle arealer i vannlinjeplan} \cdot \text{avstand til senter på hvert areal)}}{\text{Summen av alle arealer (Vannlinjeareal)}}$$

Tyngdepunktsatsen (z- retning)

$$z_G = \frac{\sum_{i=1}^n m_i z_i}{\sum_{i=1}^n m_i} = \frac{\text{Summen av (alle masser} \cdot \text{avstand til senter på hver masse)}}{\text{Summen av alle masser (Vektdeplasement)}}$$

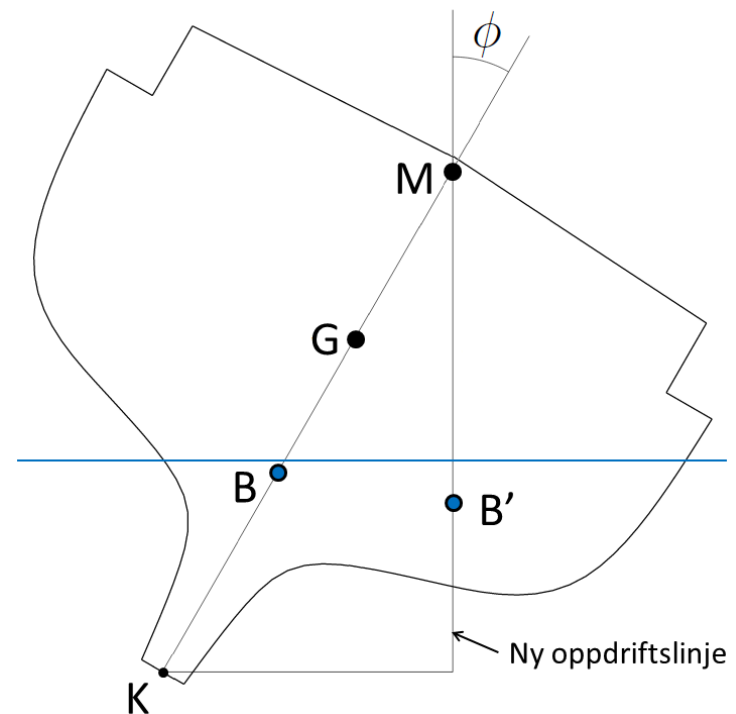
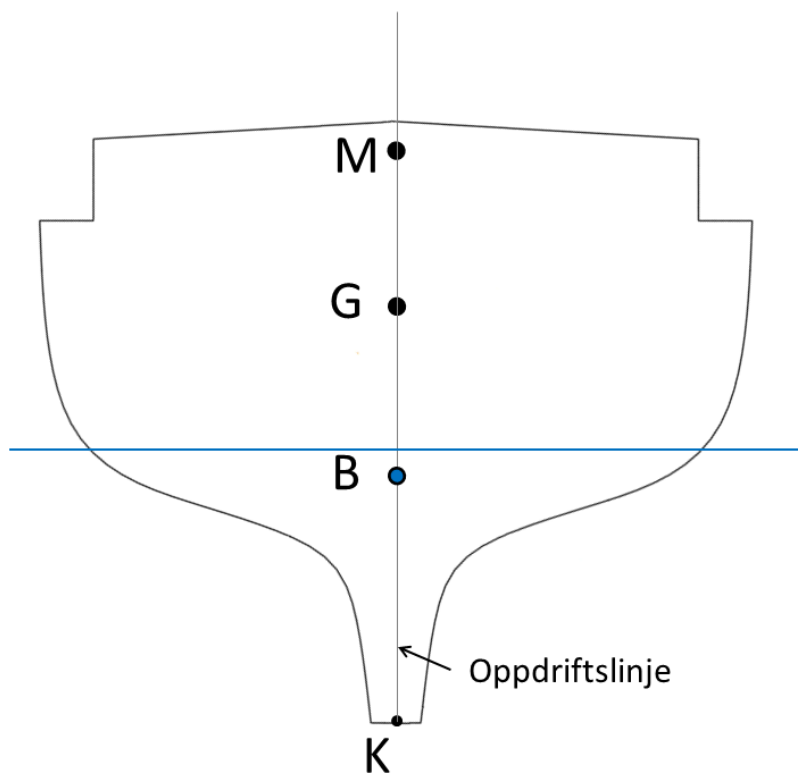
↓ Homogent materiale som fortrenses, $m=V\rho$, tetthet forsvinner.

$$z_B = \frac{\sum_{i=1}^n V_i z_i}{\sum_{i=1}^n V_i} = \frac{\text{Summen av (alle neddykkede volumer} \cdot \text{avstand til senter på hver volum)}}{\text{Summen av alle volumer (Volumdeplasement)}}$$

$$z_F = T$$

Metasenter

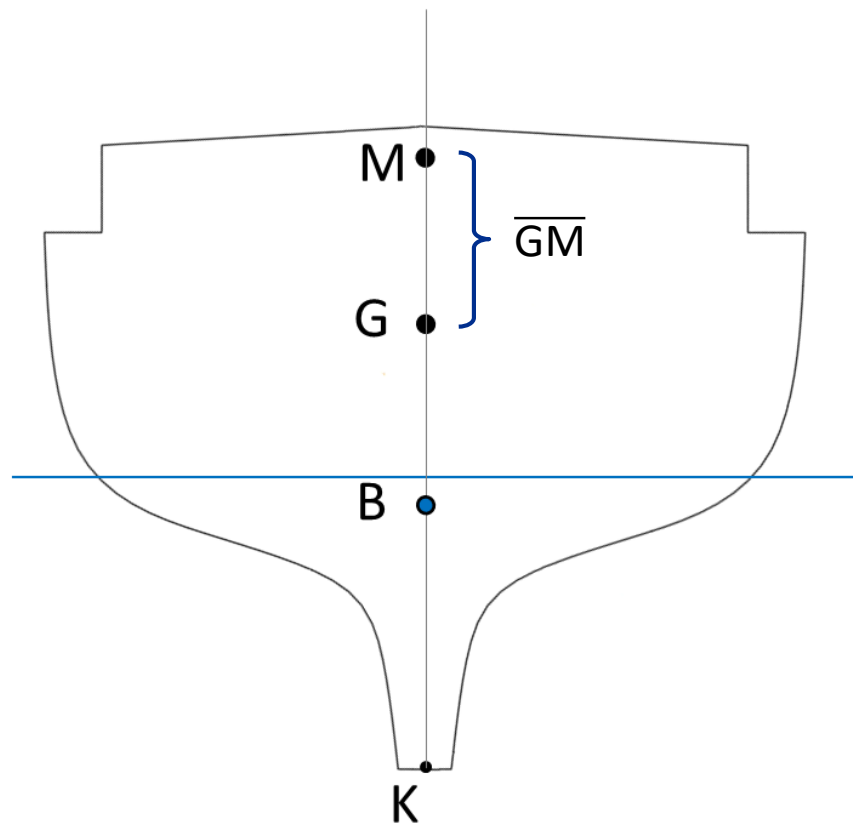
Metasenter er skjæringspunktet mellom gammel og ny oppdriftslinje når skipet krenger en vinkel ϕ . Hvor M skal ligge, bestemmes av hvor aktuelt oppdriftssenter B' ligger, dvs. av skipets form.



Ref: Basic Ship Theory p. 19

Metasenterhøyde GM

Avstanden fra skipets tyngdepunkt til metasenter, kalles metasenterhøyde og betegnes $\overline{GM}$. Hvor G ligger, bestemmes av hvordan vekten om bord er plassert.



Ref: *Basic Ship Theory* p. 93-94

Initialstabilitet

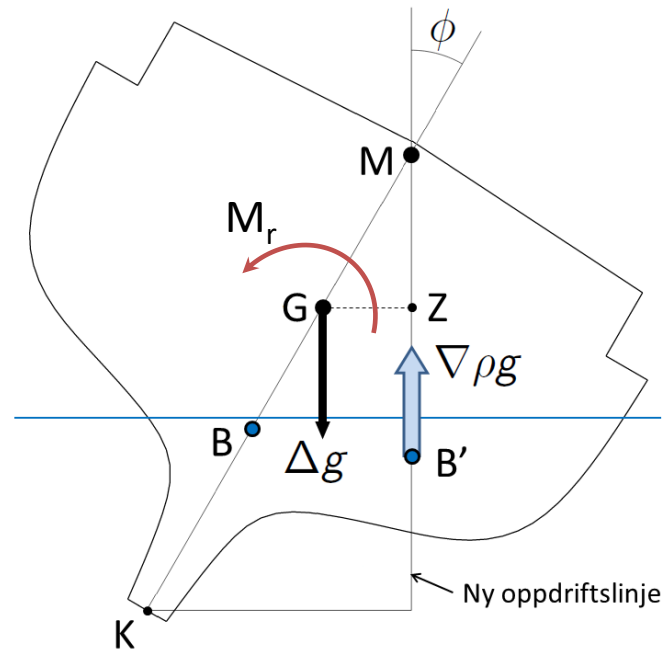
stabilitet små krengevinkler, vekt og formstabilitet



[Til innholdsfortegnelse](#)

Stabilitet ved små krengevinkler

Oppdriften og tyngden av skipet danner et kraftpar og det oppstår et moment med vektarm $\overline{GZ}$ mellom disse kraftparene når skipet blir krenget. Når M ligger over G dannes ett opprettende moment rundt G .



Det opprettende momentet rundt G gis av $M_r = \nabla \rho \overline{GZ}$ [kgm].

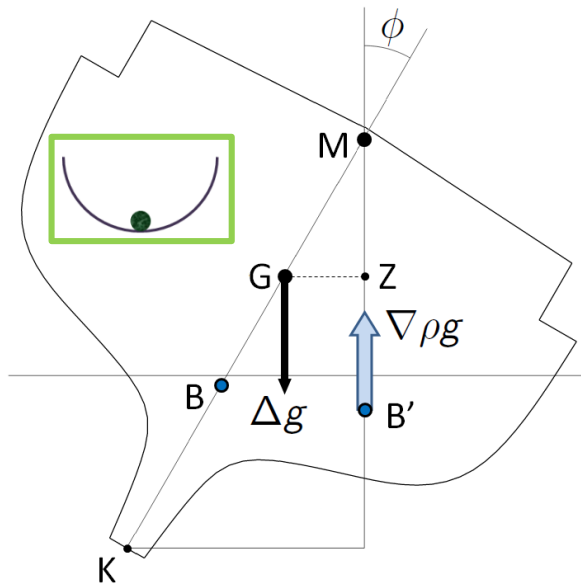
For små vinkler ($\phi < 5^\circ$) antas metasentret ligge i ro og da viser det seg geometrisk fra figuren at $\overline{GZ} = \overline{GM} \sin \phi$.

Ref: Basic Ship Theory p. 94

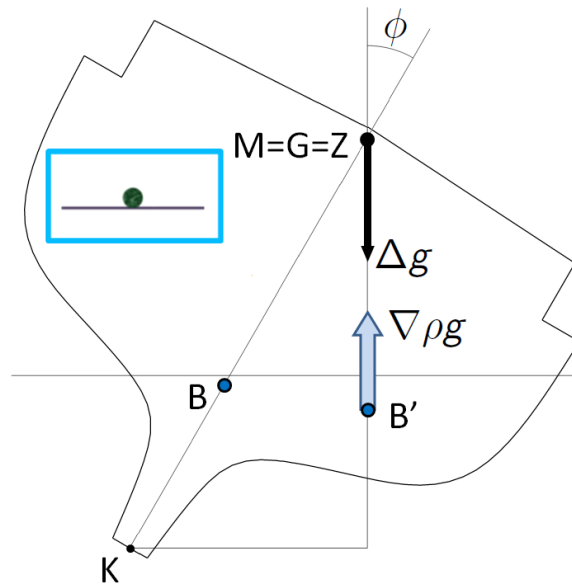
Initialstabilitet ved Metasenterhøyden $\overline{GM}$

Initialstabilitet beskriver skipets bevegelse etter en forstyrrelse. Et skip er:

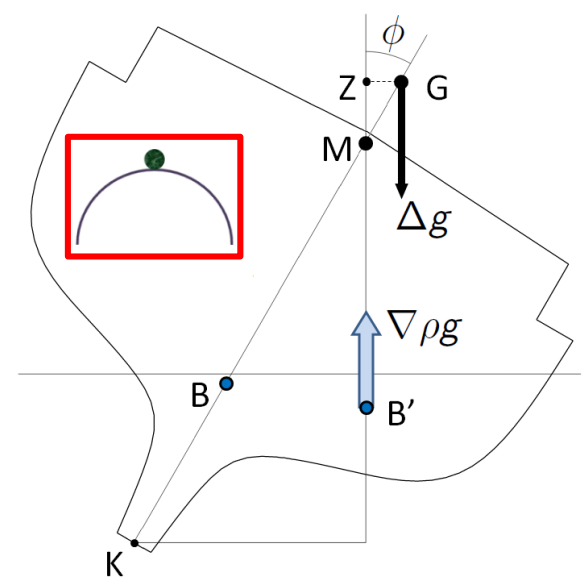
- (a) stabilt når det etter en forstyrrelse retter seg opp av seg selv,
- (b) labilt når det ved en forstyrrelse blir kvar i sin nye posisjon,
- (c) ustabilt når det etter en forstyrrelse vil krenge mer og mer.



(a) Stabilt, $\overline{GM} > 0$
 $\overline{GZ} > 0$, rettende momentarm



(b) Labilt, $\overline{GM} = 0$
 $\overline{GZ} = 0$, null moment



(c) Ustabilt, $\overline{GM} < 0$
 $\overline{GZ} < 0$, veltende momentarm

Ref: Basic Ship Theory p. 94, Intro Nav Arch. p. 36

Formstabilitet og Vektstabilitet

Formstabilitet

Formstabilitet avhenger av skipets form. Det er skipsbyggerens ansvar å designe en form som gir god stabilitet, dvs. et bredt vannlinjeareal og god forflytting av Oppdriftssenter fra B til B' ved trim og krenkning.

Vektstabilitet

Vektstabilitet avhenger av hvordan lasten blir plassert om bord. Det er Lasteoffiserens ansvar å plassere lasten slik at skipet oppfyller Stabilitetskravene, dvs. at metasenter M ligger over tyngdepunkt G .

Kvadratiske homogene elementer, eksperiment

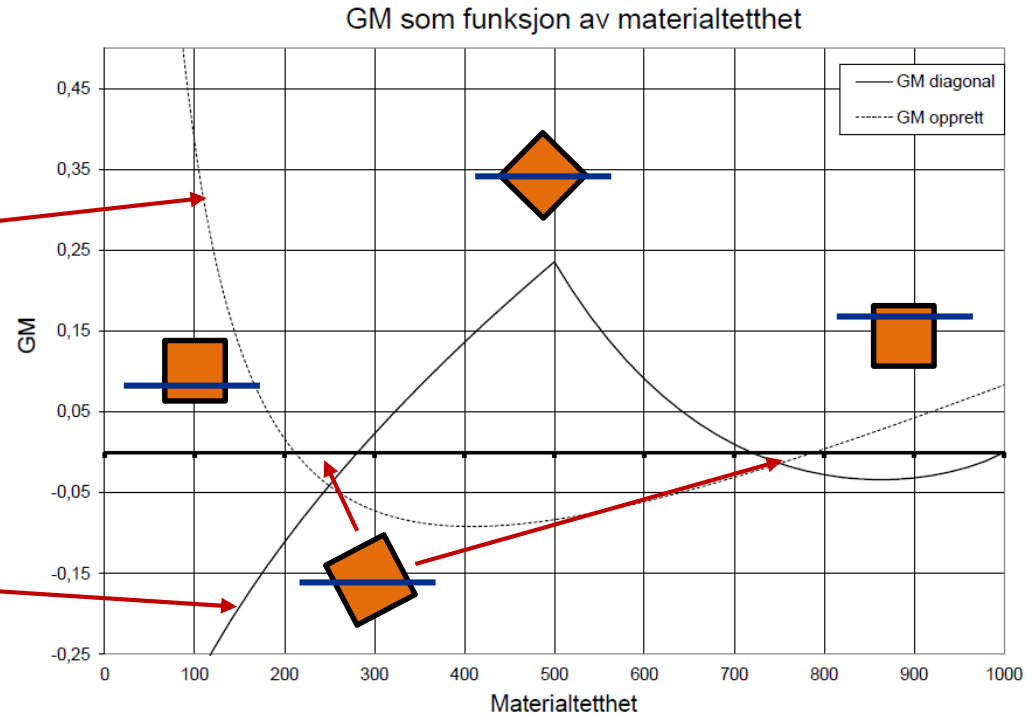
“Naturen liker positiv GM.”

$$\overline{KB} = \frac{T}{2}$$

$$\overline{KG} = \frac{D}{2}$$

$$\overline{KB} = \frac{2T}{3}$$

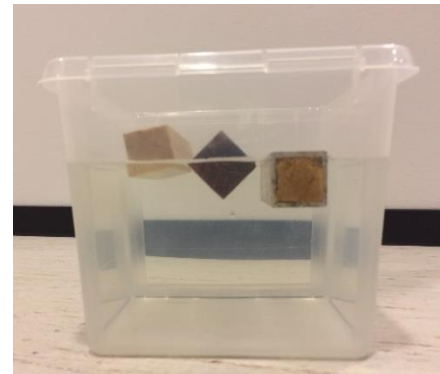
$$\overline{KG} = D \sin 45^\circ$$



$$\overline{GM} = \overline{KB} + Ix/\nabla - \overline{KG}$$

Hvor ∇ kan skrives som funksjon av materialtetthet:

$$\nabla = \frac{\Delta}{\rho_{vann}} = \frac{V_{stav} \cdot \rho_{stav}}{\rho_{vann}}$$



Beregning Metasenterhøyde $\overline{GM}$

$\overline{KB}$, $\overline{BM}$, Steiners sats, arealtregghetsmoment (2. ordens moment)

$\overline{KG}$ og virtuell tyngdepunktheving $\overline{GG'}$

Fylling og lensing av bunntanker

[Til innholdsfortegnelse](#)



Beregning initialmetasenterhøyde

En geometrisk betraktning av figuren viser at

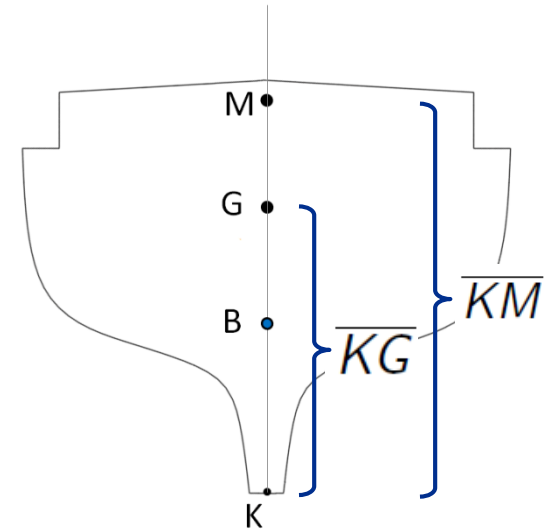
$$\overline{GM} = \overline{KM} - \overline{KG},$$

hvor $\overline{KM}$ er avstanden fra kjøll til metasenter og $\overline{KG}$ er avstanden fra kjøll til tyngdepunkt.

Videre ses at $\overline{KM} = \overline{KB} + \overline{BM}$ sånn at

$$\overline{GM} = \overline{KB} + \overline{BM} - \overline{KG}.$$

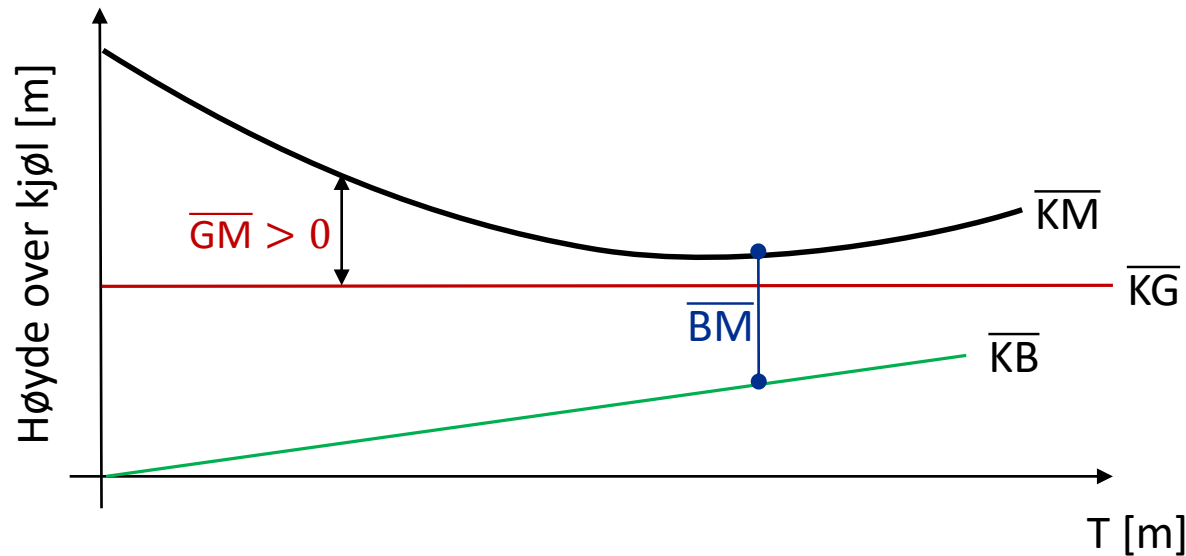
Her er $\overline{KB}$ avstanden fra kjøll til oppdriftssenter og $\overline{BM}$ er avstanden fra oppdriftssenter til metasenter.



Metasenterkurvediagram (KB-, KM- og KG-kurve)

Tilhør Øving: 1. oppg 3

Praktisk å bruke kurvediagram for å raskt kunne se at $\overline{GM}$ er positiv for alle dypganger et skip opererer i.



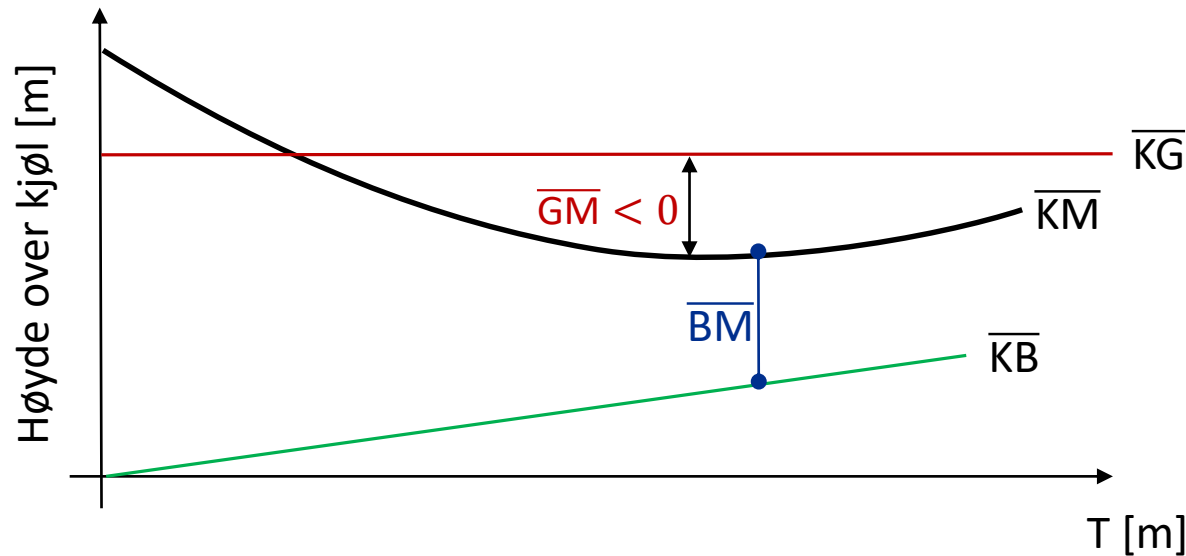
$\overline{KB}$ er kun lineær ved rake sider på legeme!

Ref: Basic Ship Theory p. 76-77, Intro Nav Arch. p. 39

Metasenterkurvediagram (KB-, KM- og KG-kurve)

Tilhør Øving: 1. oppg 3

Praktisk å bruke kurvediagram for å raskt kunne se at $\overline{GM}$ er positiv for alle dypganger et skip opererer i.



G høyt oppe,
dårlig planlagt
vektstabilitet!

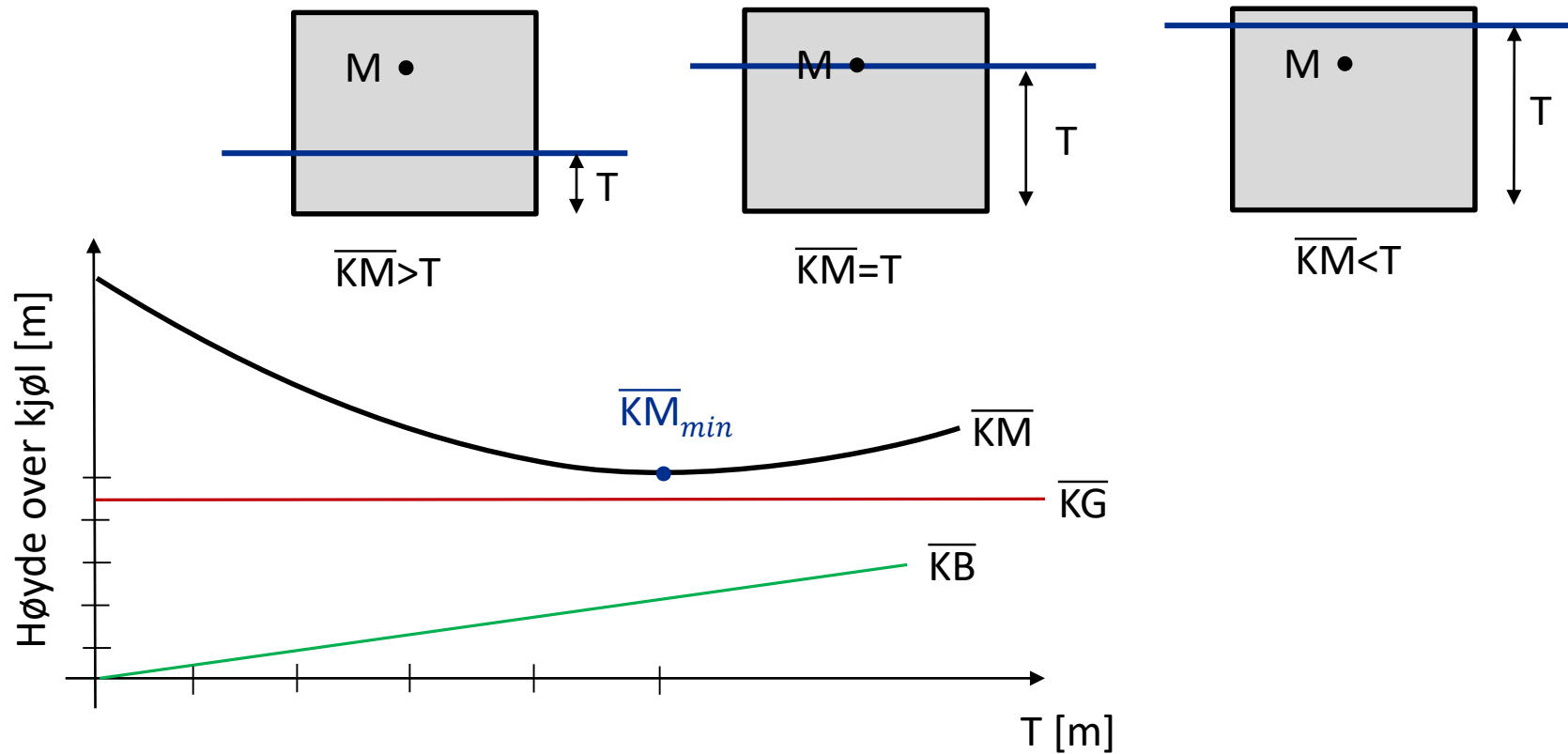
M lavt nede,
dårlig planlagt
formstabilitet!
(liten bredde på
vannlinjeareal)

Ref: Basic Ship Theory p. 76-77, Intro Nav Arch. p. 39

Metasenterkurvediagram (KB-, KM- og KG-kurve)

Fysikalsk betydelse av hva som skjer ved minimum $\overline{KM}$ verdi

→ vannlinjen skjærer M.



Ref: Basic Ship Theory p. 76-77, Intro Nav Arch. p. 39

Beregning metasenterhøyde

En geometrisk betraktning av figuren viser at

$$\overline{GM} = \overline{KM} - \overline{KG},$$

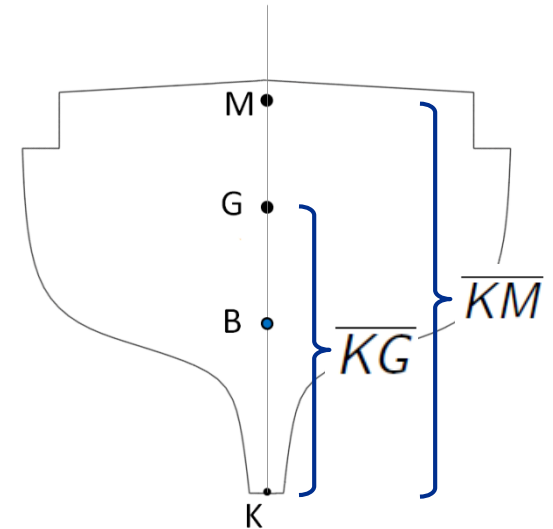
hvor $\overline{KM}$ er avstanden fra kjøll til metasenter og $\overline{KG}$ er avstanden fra kjøll til tyngdepunkt.

Videre sees at $\overline{KM} = \overline{KB} + \overline{BM}$ sånn at

$$\overline{GM} = \overline{KB} + \overline{BM} - \overline{KG}.$$

1. 2. 3.

Her er $\overline{KB}$ avstanden fra kjøll til oppdriftssenter og $\overline{BM}$ er avstanden fra oppdriftssenter til metasenter.



1. $\overline{KB}$ beregning

Vertikal plassering av B gis av skipets neddykkede form og beregnes ved hjelp av tyngdepunktssatsen for volumsenter

$$\overline{KB} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i z_i}{\sum_{i=1}^n V_i} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i z_i}{\nabla} \quad .$$

Her er V_i en neddykket volumandel av skipet, z_i er avstand til sentrum for respektive volumandel og $i = 1 \dots n$, der n er totalt antall neddykkede volumandeler. Noter att summen av alle volumandeler er det samme som volumdeplasementet ∇ . For et kasseformet skip med vertikale sider blir $\overline{KB} = T/2$, hvor T er dypgangen.

2. $\overline{BM}$ beregning (initialmetasenterradius)

Avstanden til metasenter fra oppdriftssenter gis av initialmetasenterradius

$$\overline{BM} = \frac{I}{\nabla} ,$$

hvor I er arealtrehetsmomentet for vannlinjearealet A_{VL} .

Arealtreghetsmomentet må beregnes med hensyn til en akse som går gjennom vannlinjearealets senter, dvs. Flotasjonssenter. For tverrskips $\overline{BM}_T$ brukes I_x og for langskips $\overline{BM}_L$ brukes I_y .

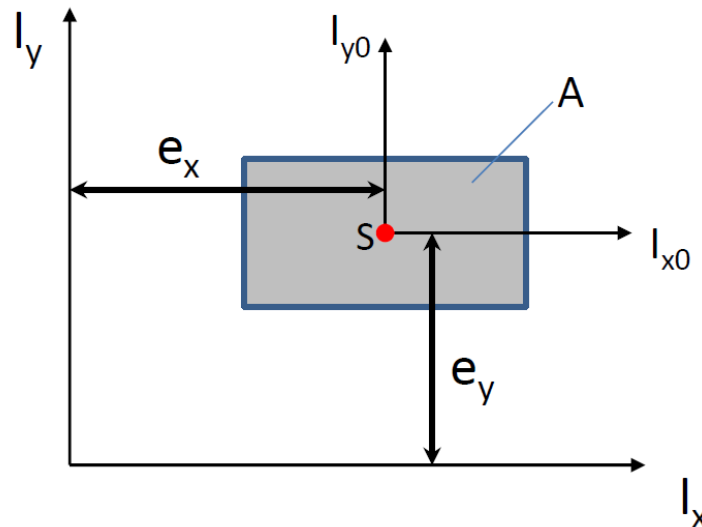
Utleddning: Basic Ship Theory p. 19-20, Intro Nav Arch p. 36-38, Havromsteknologier p. 2-14/2-15 for enkel kasseform

2. Bruk av Steiners sats ved beregning av I_x og I_y

Steiners sats (Parallellakse-teoremet) gis av

$$I_x = I_{x0} + Ae_y^2 \quad \text{og} \quad I_y = I_{y0} + Ae_x^2$$

hvor I_{x0} og I_{y0} er lokale arealtrehetsmoment for arealet A , og e_y og e_x er avstand fra global x -akse respektive y -akse til de lokale aksene. De lokale aksene går igjennom sentrum S på arealet A . For et skip er dette analogt med flotasjonssenteret, dvs. arealsenter av vannlinjearealet.



3. $\overline{KG}$ beregning

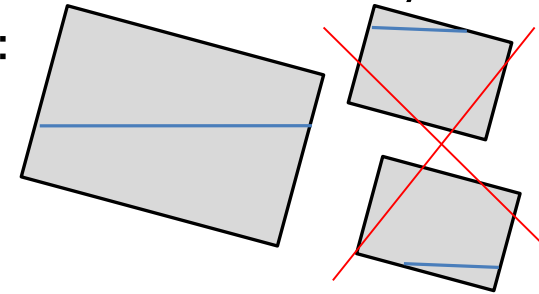
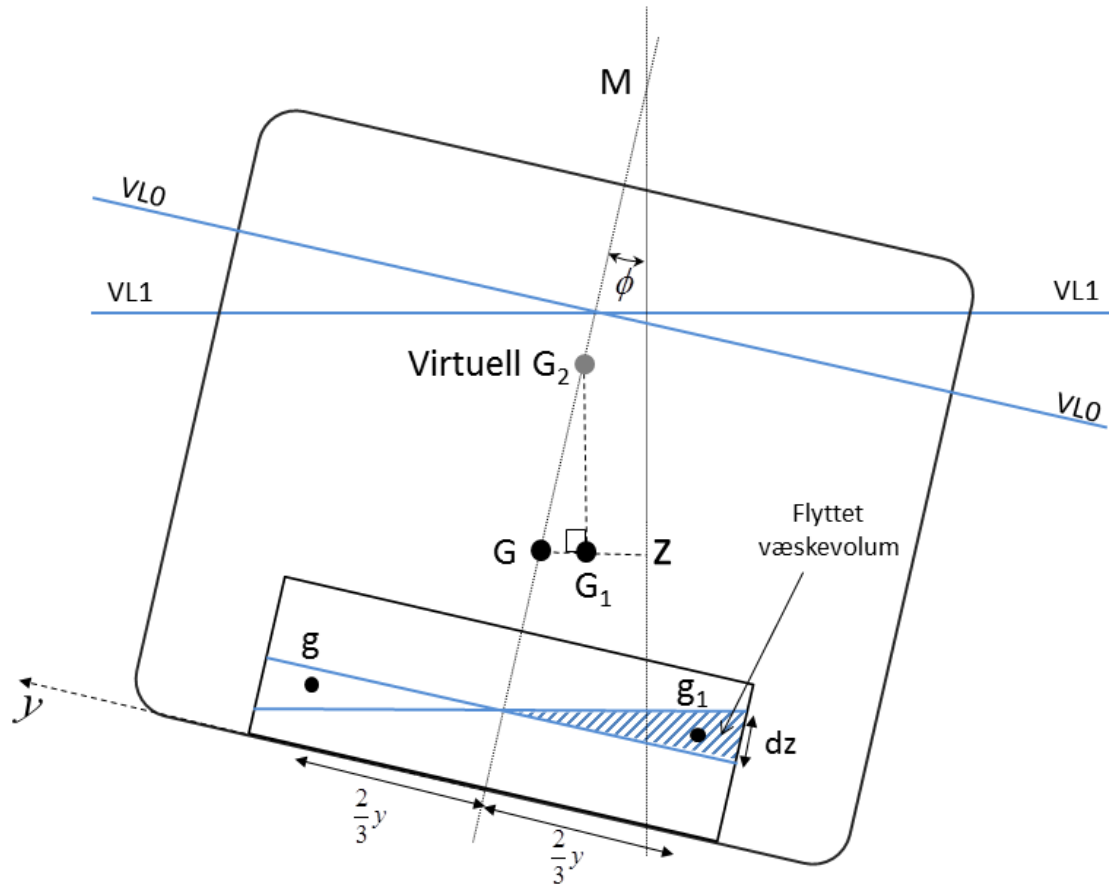
Plassering av G bestemmes av lettskipets initiale tyngdepunktplassering og av hvordan lastene om bord er plassert. For vertikal tyngdepunkt angis avstand i z fra kjøl, dvs.

$$z_G = \overline{KG} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i z_i}{\sum_{i=1}^n m_i} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i z_i}{\Delta} .$$

Her er m_i en masseandel av skipet og $i = 1 \dots n$, der n er totalt antall masser. Noter att summen av alle masser er det samme som vektdeplasementet Δ . For tverrskips tyngdepunkt y_G angis avstanden y_i fra senterlinjen positiv babord (venstre) til alle masser. For langskips tyngdepunkt x_G angis avstand x_i fra roraksen positiv forover til alle masser.

(3.) Virtuell tyngdepunktheving pga fri væske

Effekten av fri væskeoverflate. Vi betrakter en tank med væske som er fylt så at væsken ligger an på de vertikale sidene av tanken:



Virtuell tyngdepunktheving

$$\overline{GG_2} = \frac{i\rho_v}{\Delta}$$

i : arealregghetsmoment
fri væskeoverflate

ρ_v : tetthet væske i tank

Redusert stabilitet:

$$\begin{aligned}\overline{GM} &= \overline{KB} + \overline{BM} - \overline{KG} - \overline{GG_2} \\ &= \overline{KB} + \overline{BM} - (\overline{KG} + \overline{GG_2})\end{aligned}$$

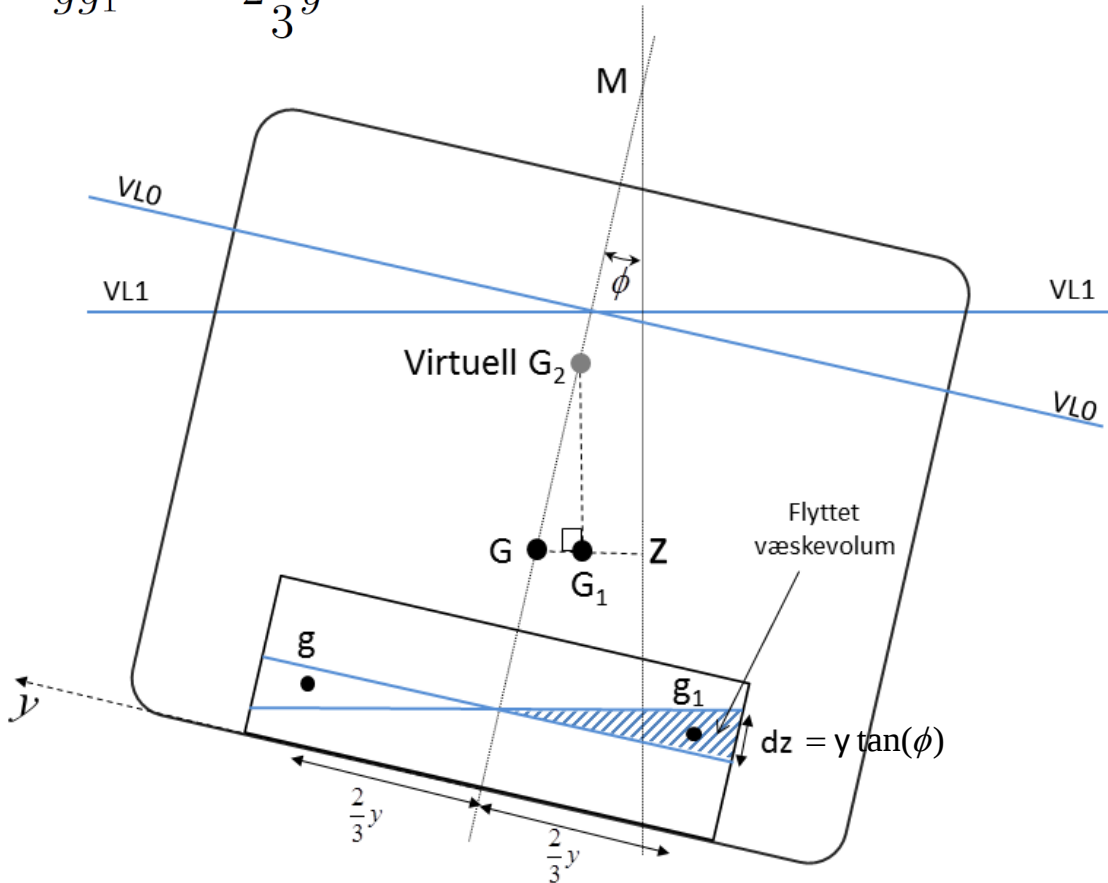
Ref: Basic Ship Theory p.103, Intro Nav Arch p. 51-53, ShipStabMastersMates p. 202->

(3.) Utledning virtuell tyngdepunktheving $\overline{GG}_2$

$$\overline{GG_1} = \overline{GG_2} \sin \phi$$

$$\overline{gg_1} = 2\frac{2}{3}y$$

$$V_v = \frac{1}{2} dz \ y \ l = \frac{1}{2} y \tan \phi \ y \ l$$



Horisontal tyngdepunktforskyving
Grunnet flyttet vækevolum:

$$\begin{aligned}\overline{GG_1} &= \frac{m_v \overline{gg_1}}{\Delta} \\ &= \frac{\rho_v V_v 2\frac{2}{3}y}{\Delta} \\ &= \frac{\rho_v \frac{1}{2}y^2 \tan \phi l 2\frac{2}{3}y}{\Delta}\end{aligned}$$

Areal-treghetsmoment = $\rho_v \frac{2}{3} y^3 l \tan \phi$

$$\sin \phi \overline{GG_2} = \frac{\rho_v i \tan \phi}{\Delta}$$

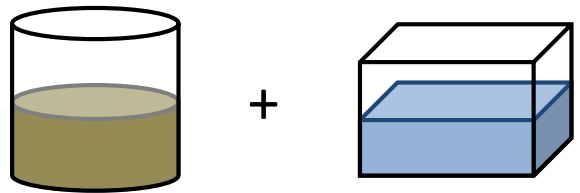
Små vinkler, $\sin \varphi \approx \tan \varphi$

$$\overline{GG_2} = \frac{i\rho_v}{\Delta}$$

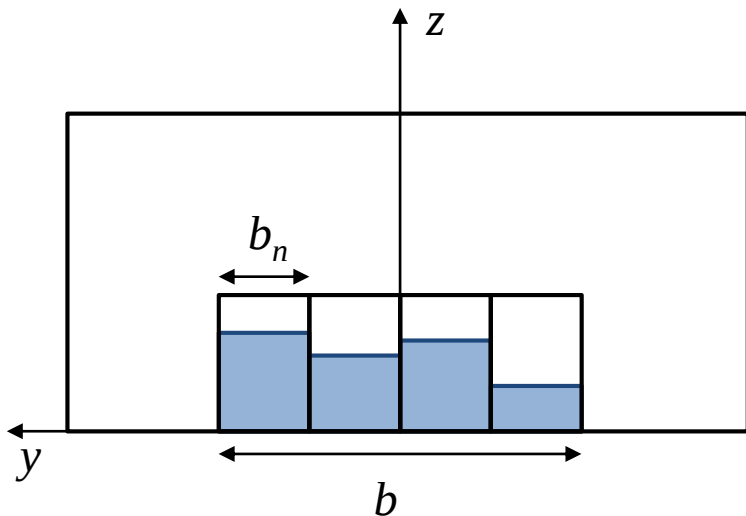
Ref: Basic Ship Theory p.103, Intro Nav Arch p. 51-53

Hvordan redusere effekt av fri væske?

Først: Når flere tanker er plassert om bord, skal hver fri væskeoverflateeffekt summeres:

$$\overline{GG}_{2,tot} = \sum \frac{i\rho_v}{\Delta} = \frac{i_{\text{sirkel}} \rho_{\text{olje}}}{\Delta} + \frac{i_{\text{rektangel}} \rho_{\text{vann}}}{\Delta}$$


Skip med bunntank som deles inn i vanntette skott, (lengde l i x retning)



$$i = i_n n, \quad b_n = b/n, \quad i_n = \frac{lb_n^3}{12}$$

$$\overline{GG}_{2,tot} = \sum \frac{i\rho_v}{\Delta} = \frac{i_n n \rho_v}{\Delta} = \frac{lb^3 n \rho_v}{12n^3 \Delta}$$

$$\overline{GG}_{2,tot} = \frac{i\rho_v}{\Delta n^2} \quad \boxed{\overline{GG}_{2,tot} \propto \frac{1}{n^2}}$$

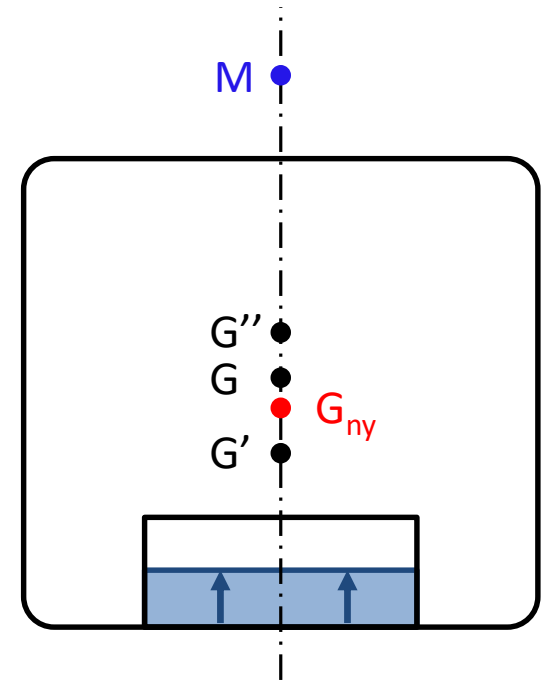
Å dele inn en tank med vanntette skott, reduserer $\overline{GG}_{2,tot}$ kvadratisk med antall tanker.

Fylling og lensing av bunntanker

Ved fylling av bunntanker fra å være helt tom, vil det være 2 faktorer som påvirker stabiliteten:

1. G går ned til G' da en tilføres en vekt lavt nede i legemet.
2. G går opp til G'' pga fri væskeoverflate

Den samlede effekten vil avgjøre hvor meget metasenterhøyden vil bli redusert eller økt.

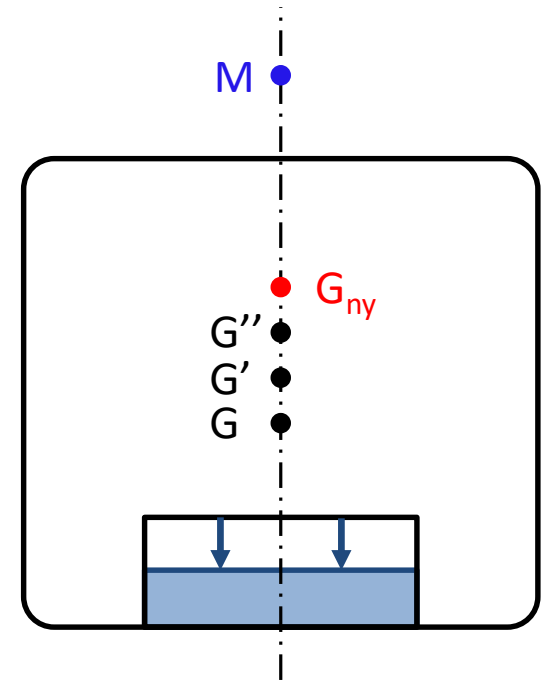


Fylling og lensing av bunntanker

Ved lensing av bunntanker fra å være helt fulle vil det ha følgende effekter på stabiliteten:

1. G går opp til G' da en fjerner en vekt lavt nede i legemet.
2. G går opp til G'' pga fri væskeoverflate

Den samlede effekten gir at metasenterhøyden alltid vil reduseres.



Kreng- og Trimvinkel

usymmetrisk last, flytting/fjerning/tilføring last, minste fribord, lastelinjekonvesjonen

Antar små vinkler, dvs at vannlinjearealet og neddykket volum ikke forandrer seg og ikke må beregnes på nytt ved trim/krengning. GM =konstant ved likt deplasement.

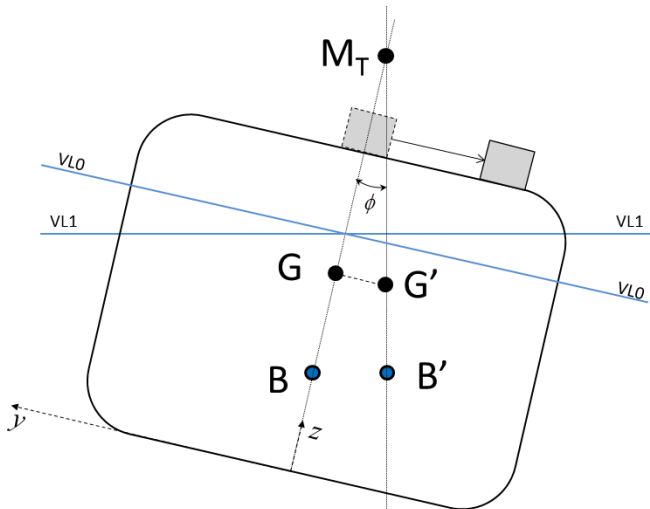
[Til innholdsfortegnelse](#)



Krengenvinkel/Trimvinkel ved usymmetrisk last

Krengenvinkel definert positiv mot styrbord

Trimvinkel definert positiv når baug går ned

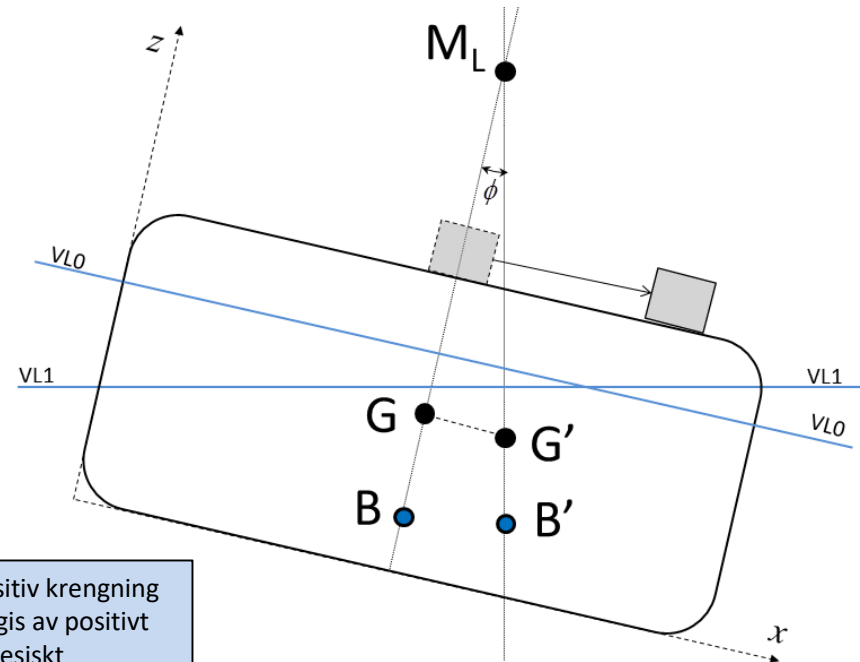


En last plassert på styrbord side, gir positiv krenning etter definisjonen at positiv krenning gis av positivt krennemoment rundt x-aksen. Pga kartesisk koordinatsystem, gir dette en negativ verdi for posisjonen av lasten langs med y-aksen. For å tilfredsstille definisjonen for positiv vinkel, må krengevinkelen multipliseres med (-1).

$$\tan \phi = \frac{\overline{GG'}}{\overline{GM_T}} (-1)$$

$$\overline{GG'} = y_{G', med last} - y_{G, ved \phi=0 med last}$$

Konstant GM, små vinkler og deplasement må være likt!

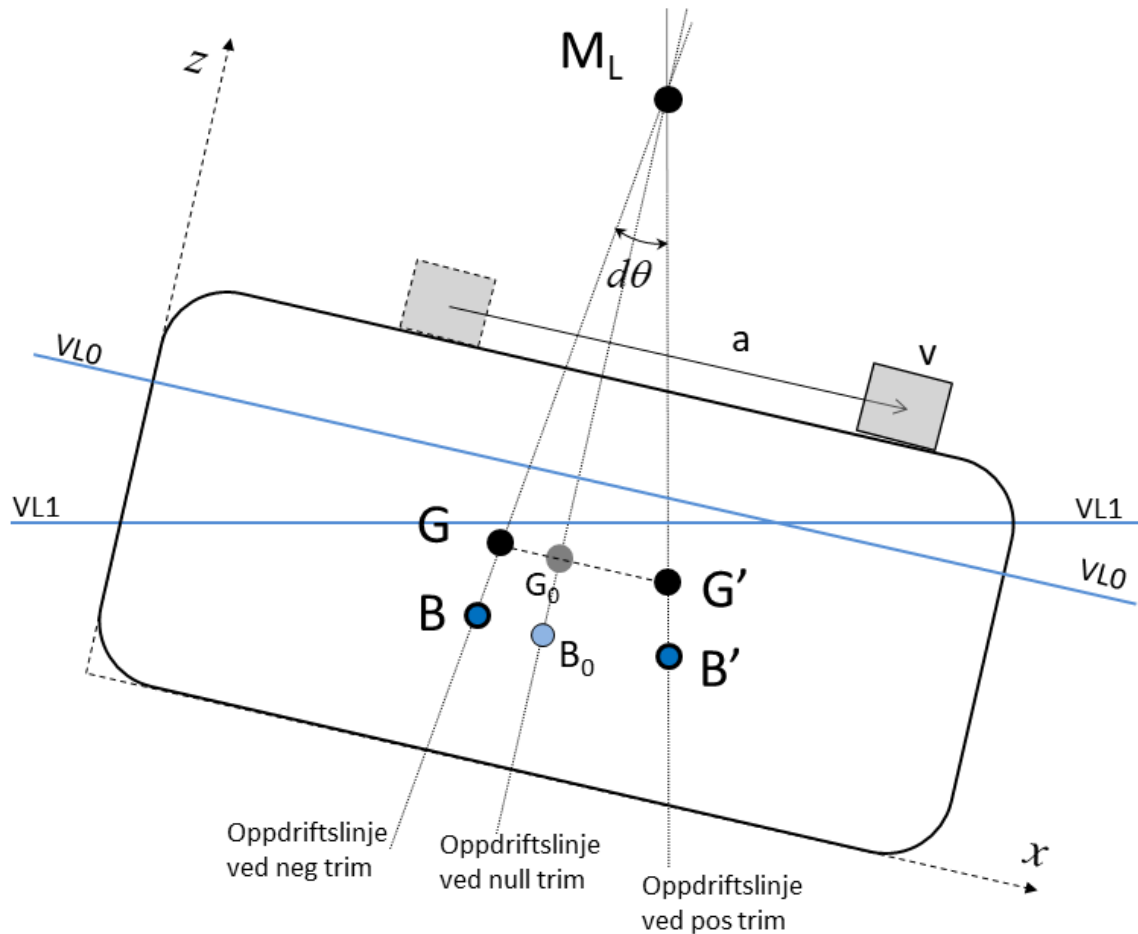


$$\tan \theta = \frac{\overline{GG'}}{\overline{GM_L}}$$

$$\overline{GG'} = x_{G', med last} - x_{G, ved \theta=0 med last}$$

Vinkelendring pga Flytting (Fjerning/Tilføring) av last

Når man raskt vil beregne vinkelendring om bord i krenkning eller trim:



Flytting : $\overline{GG'} = \frac{va}{\Delta}$

Tilføring : $\overline{GG'} = \frac{va}{\Delta + v}$

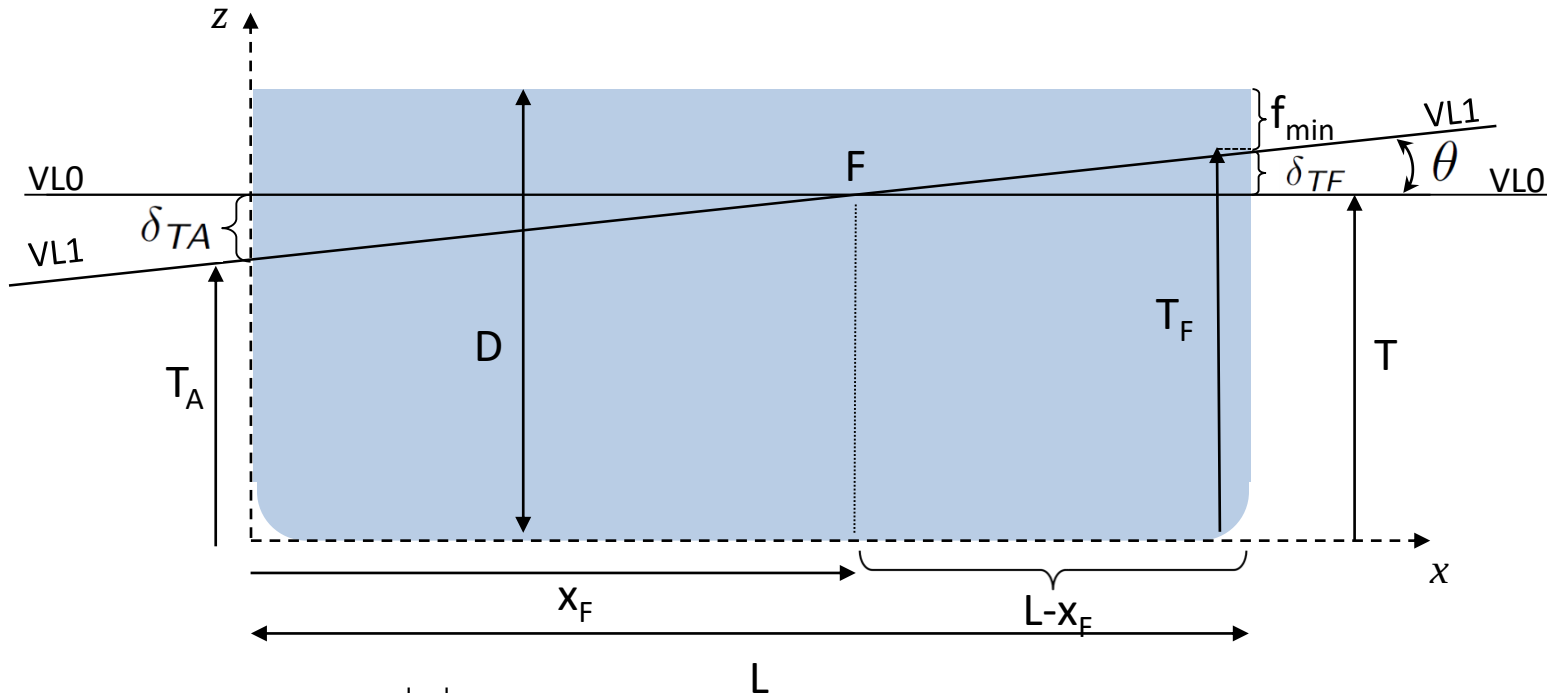
Fjerning : $\overline{GG'} = \frac{va}{\Delta - v}$

Små vinkler

$d\phi \approx \text{atan}\left(\frac{\overline{GG'}}{\overline{GM_T}}\right) (-1)$

$d\theta \approx \text{atan}\left(\frac{\overline{GG'}}{\overline{GM_L}}\right)$

Minste fribord ved trim



$$\delta_{TF} = (L - x_F) \tan(|\theta|)$$

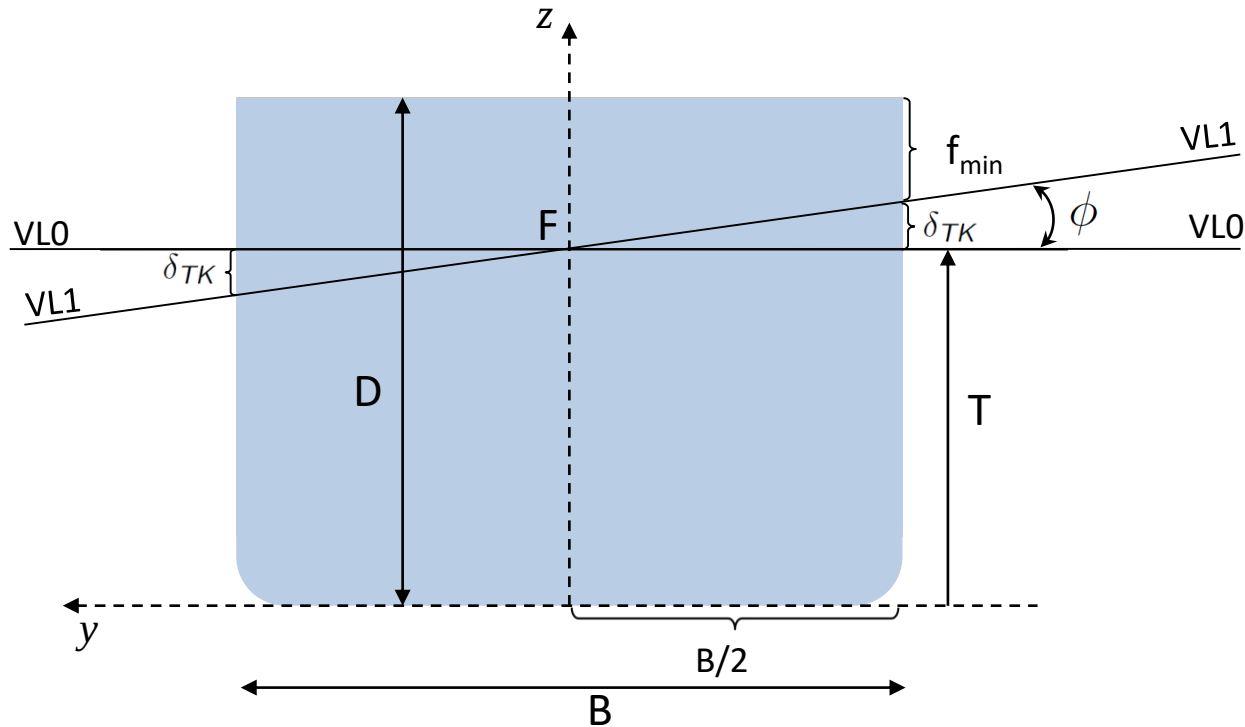
$$\delta_{TA} = x_F \tan(|\theta|)$$

Trim definisjon i avstand $t = T_F - T_A$
(positiv verdi baug ned)

$$f_{\min} = D - T - (L - x_F) \tan(|\theta|) \quad \text{ved positiv trimvinkel baug ned}$$

$$f_{\min} = D - T - x_F \tan(|\theta|) \quad \text{ved negativ trimvinkel hekk ned}$$

Minste fribord ved krenkning



$$\delta_{TK} = \frac{B}{2} \tan(|\phi|)$$

$$f_{\min} = D - T - \frac{B}{2} \tan(|\phi|) \quad \text{positiv krengevinkel mot styrbord}$$

Minste fribord ved krenkning og trim

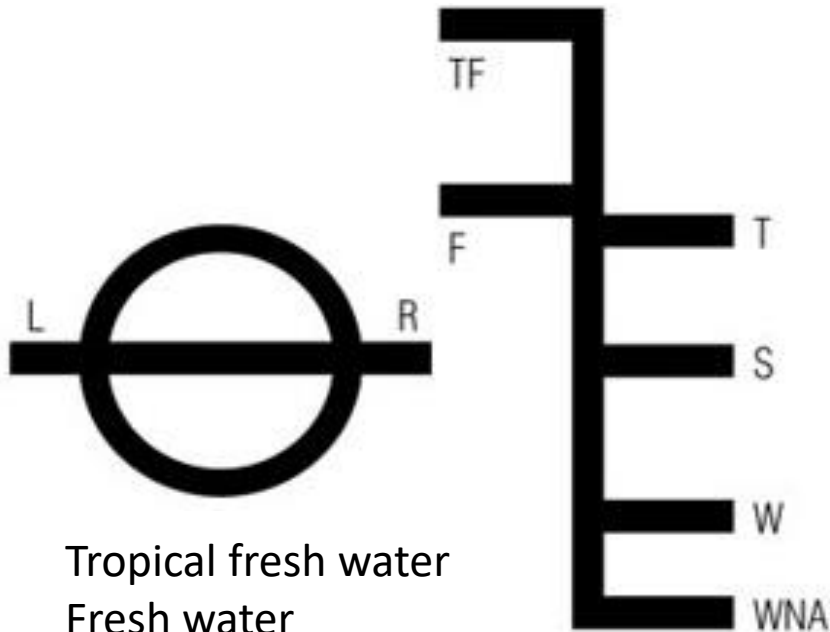
For små krenge og trimvinkler er det en god tilnærmelse at subtrahere endringen i dypgang grunnet krenkning og grunnet trim separat fra størrelsen D .

$$\theta > 0 \quad f_{min} = D - T - \delta TK - \delta TF$$

$$\theta < 0 \quad f_{min} = D - T - \delta TK - \delta TA$$

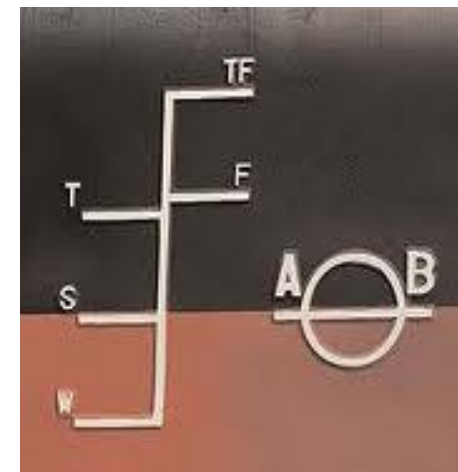
Lastelinjekonvensjonen

(ICLL International convention on load lines)



TF	Tropical fresh water
F	Fresh water
T	Tropical salt water
S	Salt water in summer
W	Salt water in winter
WNA	Winter in North Atlantic

LR Lloyd's Register (AB,NV,CM etc for different countries)



Tungløft

Fritt hengende last, kranoperasjon



[Til innholdsfortegnelse](#)



Fritt hengende last

Den fritt hengende vekten W vil ved en ny krengevinkel plassere seg rett under sin opphengningspunkt S . Effekten på skipet er at det virker som at lasten er plassert i punktet S .

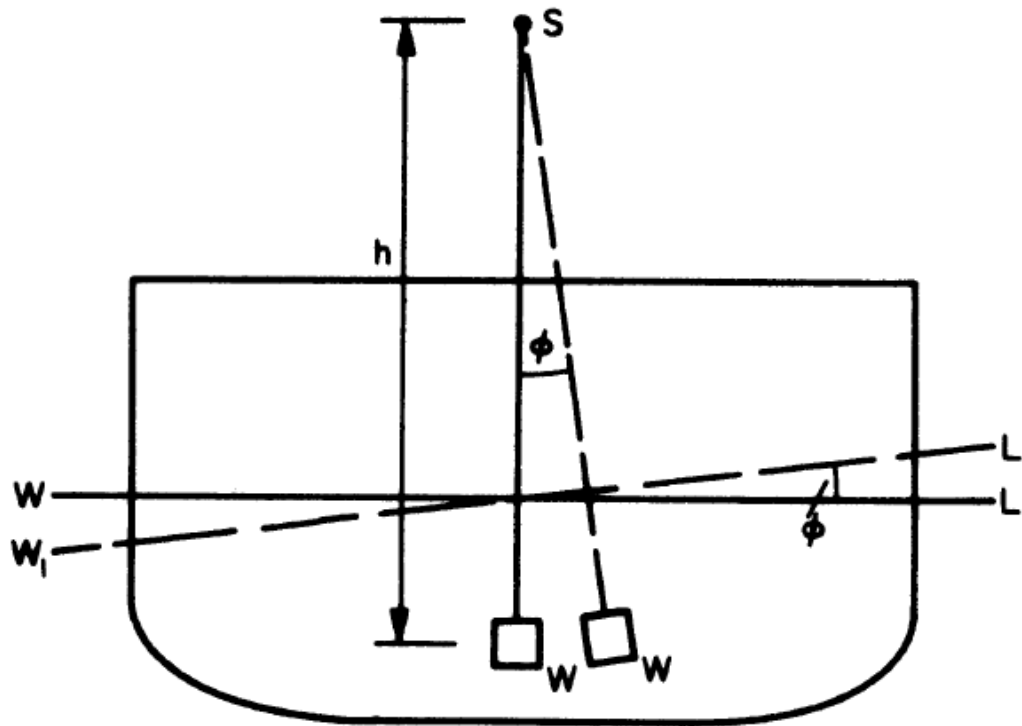
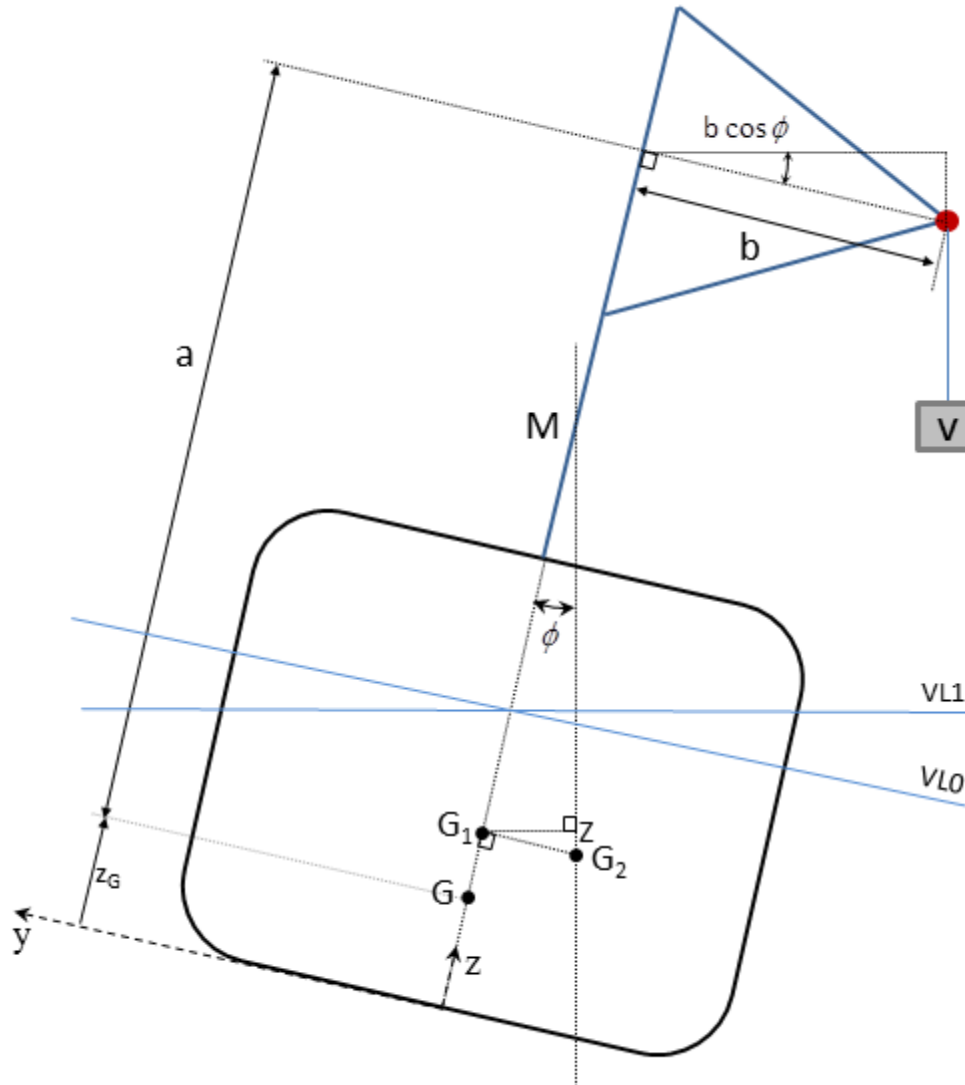


Fig. 4.6 Freely suspended weight , p. 101 Basic Ship Theory.

Fritt hengende last – Tungløft med kran



Når løftet tas vil tyngde-punktet G heves til G1 og forskyves sidledes til G2.

Vekten har sitt angrepspunkt i opphengningspunktet.

Globalt ny tyngdepunkt fra origo :

$$z_{G1} = \frac{\Delta z_G + v(z_G + a)}{\Delta + v}$$

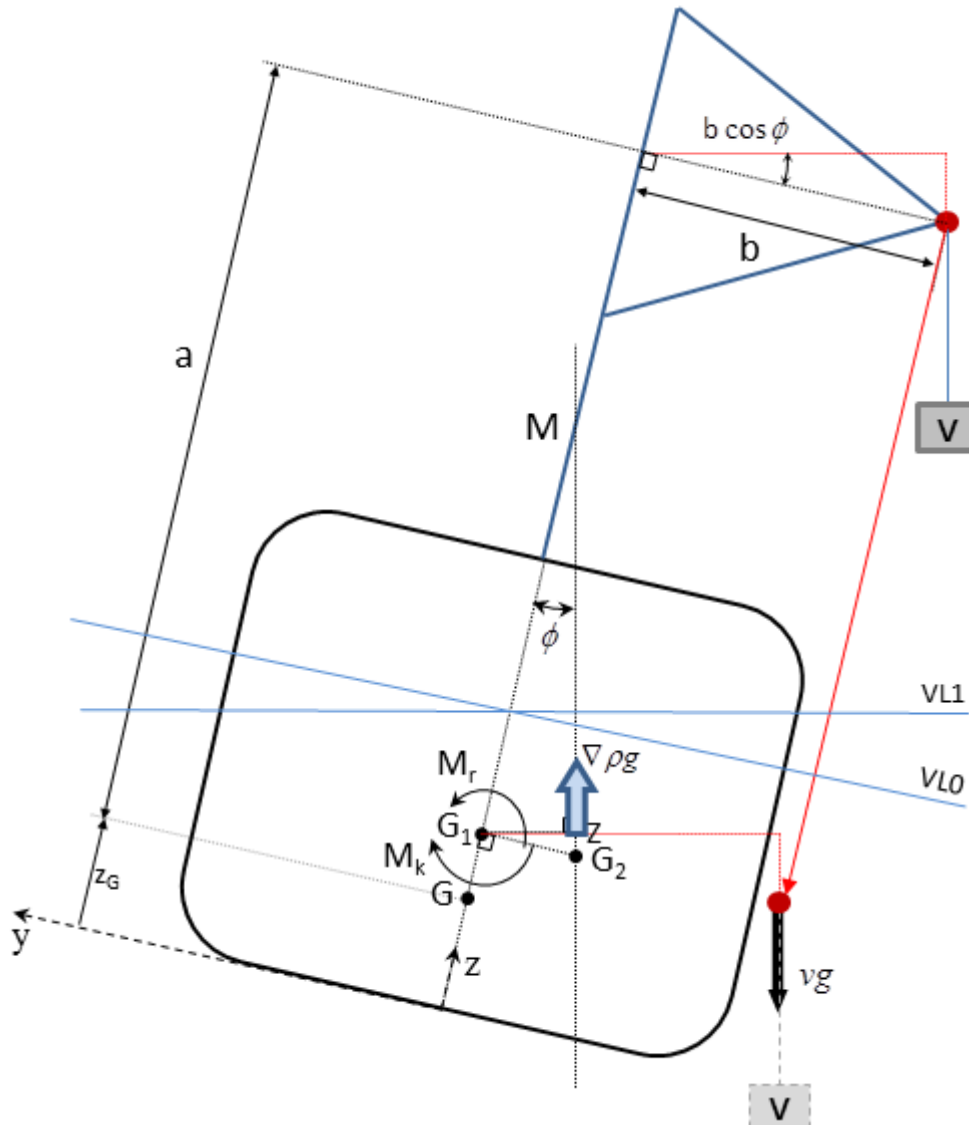
$$y_{G2} = \frac{\Delta y_G + v(y_G + b)}{\Delta + v} = (y_G = 0) = \frac{v b}{\Delta + v}$$

Tyngdepunktforskyving :

$$\overline{GG_1} = \frac{v a}{\Delta + v}$$

$$\overline{G_1 G_2} = \frac{v b}{\Delta + v}$$

Tungløft likevekt



Krengende moment fra last :

$$M_K = v b \cos \phi$$

Rettende moment fra oppdrift :

$$M_R = (\Delta + v) \overline{G_1 Z}$$

Ny likevekt med last :

$$M_K = M_R$$

$$v b \cos \phi = (\Delta + v) \overline{G_1 Z}$$

$$\overline{G_1 Z} = \frac{v b \cos \phi}{\Delta + v} = \overline{G_1 G_2} \cos \phi$$

Numerisk integrasjon

$\overline{GM}$ beregning kurvete geometrier, Simpson – og Trapez metode

Generalisering av følgende beregninger for kurvete geometrier:

- Vannlinjeareal og flotasjonssenter beregninger
- Arealtreghetsmoment-beregning for BM_T og BM_L
- Beregning av neddykket volum og volumsenter.

Disse trengs for å kunne beregne GM_T og GM_L .

[Til innholdsfortegnelse](#)



Generelle integraler

$$\text{Areal under en kurve} = \int y dx$$

$$\text{1. ordens moment} = \int xy dx \quad \text{rundt } y\text{-aksen}$$

$$= \int \frac{1}{2} y^2 dx \quad \text{rundt } x\text{-aksen}$$

$$\text{2. ordens moment} = \int x^2 y dx \quad \text{rundt } y\text{-aksen} = I_y, \text{ treghetsmoment}$$

$$= \int \frac{1}{3} y^3 dx \quad \text{rundt } x\text{-aksen} = I_x, \text{ treghetsmoment}$$

$$\text{Tyngdepunktsats} = \frac{\text{1. ordens moment}}{\text{Areal under en kurve}}$$

Ref: Intro Nav Arch p. 24 (i 3rd edition fra 1996 er det en feil i boken for 2. ordens moment rundt x-aksen, $1/3y^3$ stemmer.)

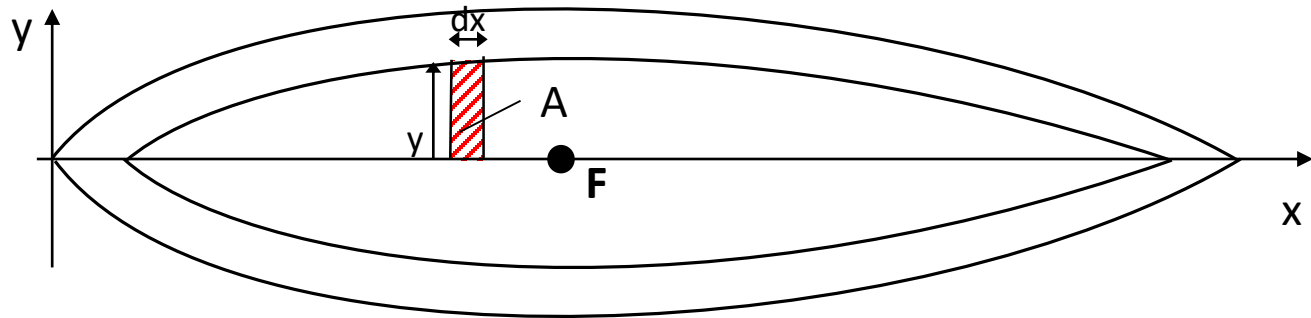
Vannlinjeareal og flotasjonssenter integrasjon

Flotasjonssenter, reminder :

$$x_F = \frac{\sum_{i=1}^n A_i x_i}{\sum_{i=1}^n A_i} = \frac{\int xy dx}{\int y dx} = \frac{M_y}{A_w} = \frac{\text{1.ordens moment (for areal)}}{\text{Areal under kurven}}$$

Det er vanlig at bare halve symmetriplanet av skipet beskrives geometrisk, dvs at y koordinatene beskriver halve vannlinjebredden av skipet. Man må då huske på at arealmoment og vannlinjeareal må multipliseres med 2.

$y_F = 0$, pga symmetri.

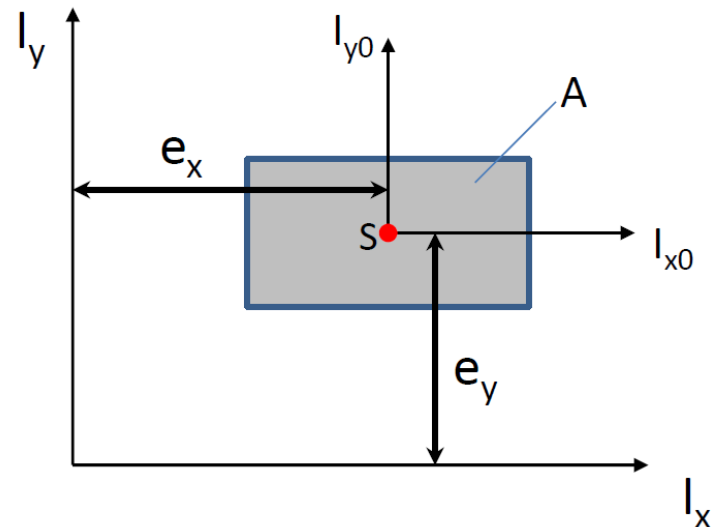


Arealtreghetsmoment (2. ordens moment)

For BM beregningen langsips og tverrskips trengs arealtreghetsmomentet av vannlinjearealet. Dette er det samme som 2. ordens moment. Bruker man x og y verdier gitt med origo fra hekken og integrerer med disse, så resulterer dette i treghetsmomentet rundt hekken. Omvendt Steiners sats må brukes for å finne arealtreghetsmomentet rundt flotasjonssenteret, dvs I_{y0} for A_w .

$$I_y = I_{y0} + A_w x_F^2$$

$$I_{y0} = I_y - A_w x_F^2$$

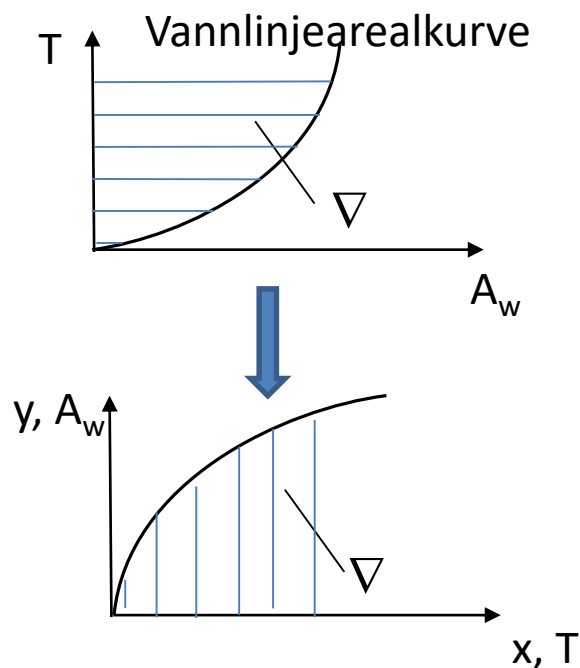


Volumdeplasement og Oppdriftssenter integrasjon

Oppdriftssenter, reminder :

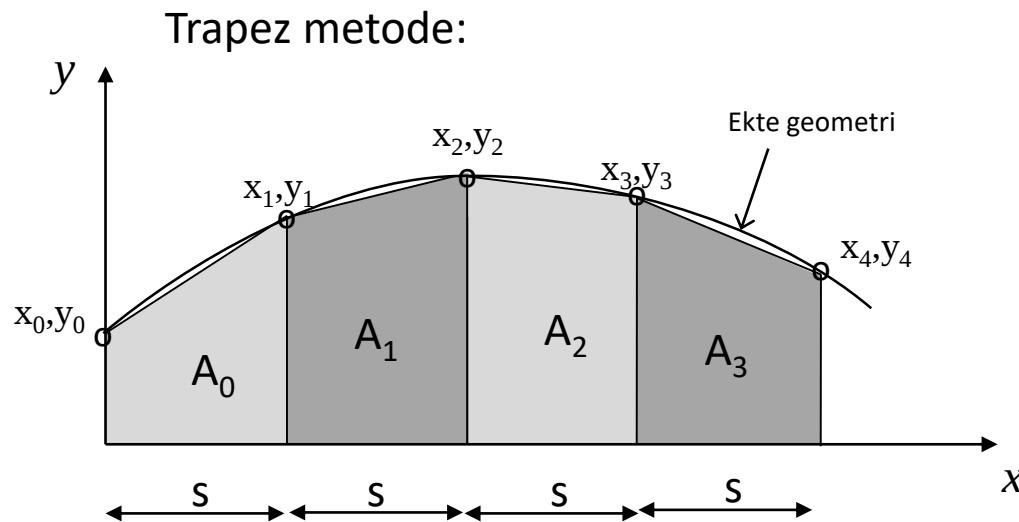
$$z_B = \frac{\sum_{i=1}^n V_i z_i}{\sum_{i=1}^n V_i} = \frac{\int z \overbrace{A_w dz}^{V_i}}{\int A_w dz} = \frac{M}{\nabla} = \frac{\text{1.ordens moment (for volum)}}{\text{Areal under kurven}} = \text{tyngdepunktsats}$$

Integrasjonsmetode den samme, bare at man nå integrerer verdier på vannlinjearal over dypgangen T . Dvs T er vårt x verdi og A_w vårt y verdi og arealet under (til venstre om) kurven er volumdeplasementet.



Numerisk integrasjon

For å kunne beregne integraler eksakt, trengs en eksakt funksjon $y=f(x)$. Ofte finnes ikke en slik funksjon, dersom det bare er tilfeldig fordelte punkter som beskriver en skroggeometri. Då brukes numerisk integrasjon for å kunne finne ut av arealet, 1. ordens moment og 2. ordens moment til denne geometrien. Den enkleste metoden er Trapez metode illustrert:



Hvert areal av en trapez :

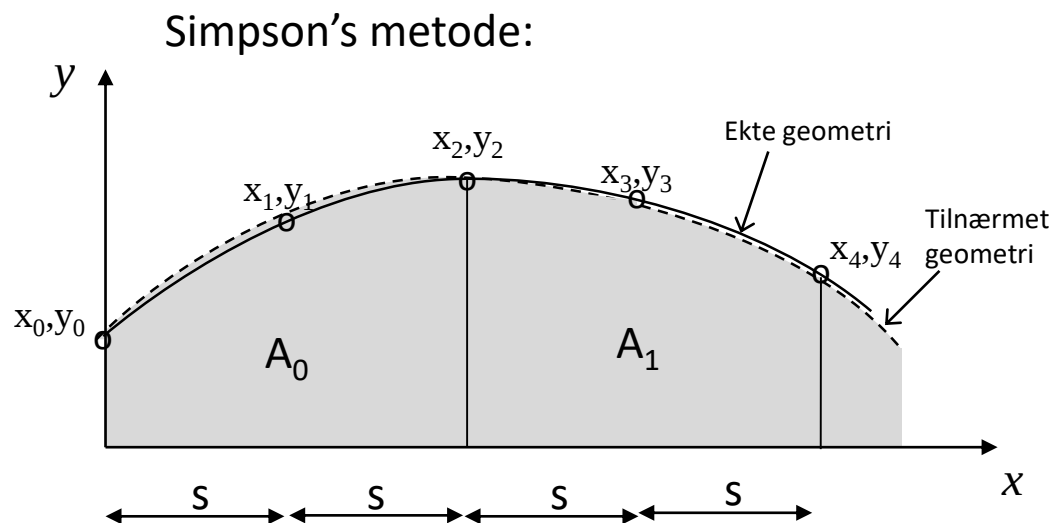
$$A_i = \frac{s}{2}(y_i + y_{i+1})$$

Tilnærmet totalareal:

$$A_{tot} = \frac{s}{2}(y_0 + 2y_1 + 2y_2 + 2y_3 + y_4)$$

Numerisk integrasjon

Det kan være slik at man bare har veldig få punkter gitt fra en tegning eller målinger av en kurvete skroggeometri. Da er det viktig å velge rett integrasjonsmetode. Simpson's metode tilnærmer et. 2 ordens polynom til **tre** gitte punkter og tilnærmingen til en kurvete geometri blir nøyere enn med Trapez.



Hvert areal under tre punkter:

$$A_i = \frac{S}{3}(y_i + 4y_{i+1} + y_{i+2})$$

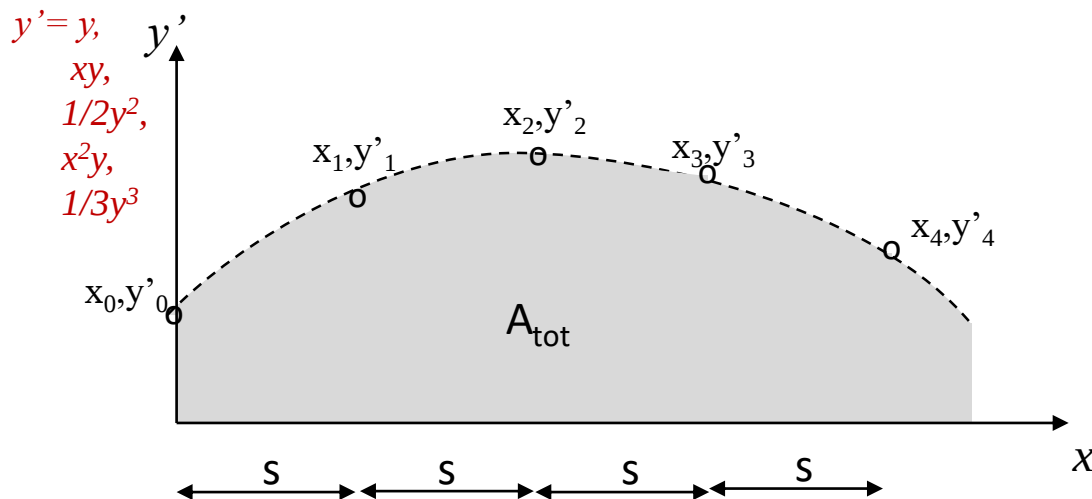
Tilnærmet totalareal:

$$A_{tot} = \frac{S}{3}(y_0 + 4y_1 + 2y_2 + 4y_3 + y_4)$$

Siden Simpson metoden bruker tre punkter, så må antall punkter som arealet tilnærmes under være odde i antall, minimum 3 st.

Numerisk integrasjon

Integrasjonsmetoden er den samme om man regner areal, 1. ordens moment eller 2. ordens moment. En integrasjon er alltid en beregning av et areal under en kurve, men enheten på dette areal kan være vad som helst, dvs man integrerer i en dx retning med ulike verdier på y akse. Matematisk sett har man ulike **integrand** y' . (En integrand er den parameteren som blir integrert). Neden er integrandene for et areal, 1. ordens moment og 2. ordens moment vist på y -aksen:



x verdiens enhet typisk for skip:
langs med trinnet i integralen.
 dx , langskips
 dz , med dypgang

y verdien typisk for skip:
 $B/2$, halvbredde $\rightarrow A_w, x_F, I_x, I_y$
 A_w , Vannlinjearealer
 A_t , Tverrskipsarealer } ∇

I praktikken, bruk av Simpson/Trapez

Generelt Trapez :

$$I = \frac{s}{2}(y_0 + 2y_1 + 2y_2 + \dots + 2y_{n-1} + y_n) = \frac{s}{2} \underset{\substack{\text{Trapez} \\ \text{Faktorer}}}{\underset{1 \times n}{[1 \ 2 \ 2 \dots 2 \ 1]}} \underset{\substack{\text{Integrand } y'}}{\underset{n \times 1}{\begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_{n-1} \\ y_n \end{bmatrix}}} = \frac{s}{2} TF * y'$$

Generelt Simpson :

$$I = \frac{s}{3}(y_0 + 4y_1 + 2y_2 + 4y_3 + 2y_4 \dots + 4y_{n-1} + y_n) = \frac{s}{3} \underset{\substack{\text{Simpson} \\ \text{Faktorer}}}{[1 \ 4 \ 2 \ 4 \ 2 \dots 4 \ 1]} \begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_{n-1} \\ y_n \end{bmatrix} = \frac{s}{3} SF * y'$$

I praktikken for skip (Eks ved Simpson)

$$A_w = \frac{S}{3} SF * (y)'$$

Vannlinjeareal

$$M_y = \frac{S}{3} SF * (xy)'$$

1. ordens moment rundt y - aksen

Vil man bruke Trapez, så er det bare å erstatte at skrittet deles med 2 og bruke Trapez faktorene

$$x_F = \frac{M_y}{A_w}$$

Flotasjonssenter fra y aksen i x - retning

$$M_x = \frac{1}{2} \frac{S}{3} SF * (y^2)'$$

1. ordens moment rundt x - aksen

$$y_F = \frac{M_x}{A_w}$$

Flotasjonssenter fra x aksen i y - retning, oftest 0 pga symmetri

$$I_y = \frac{S}{3} SF * (x^2 y)'$$

2. ordens moment rundt y - aksen, arealtregghet vannlinjeplan

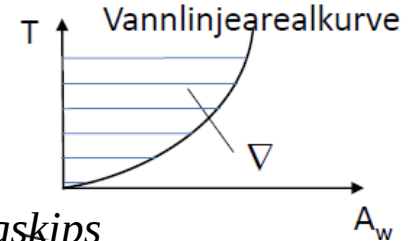
$$I_x = \frac{1}{3} \frac{S}{3} SF * (y^3)'$$

2. ordens moment rundt x - aksen, arealtregghet halvt vannlinjeplan

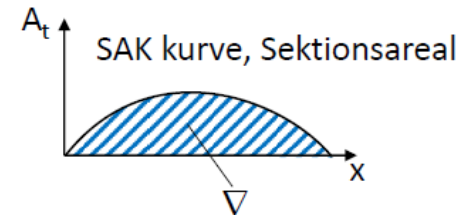
...

I praktikken for skip (Eks ved Simpson)

$$\nabla = \frac{s}{3} SF * (A_w)' \quad \text{Volumdeplasement via vannlinjearealer, } s : \text{trinn i dypgangsretning}$$



$$\nabla = \frac{s}{3} SF * (A_t)' \quad \text{Volumdeplasement via tverrsnittsarealer, } s : \text{trinn langsips}$$



$$M_y = \frac{s}{3} SF * (zA_w)' \quad \text{1.ordens moment vertikal retning}$$

$$z_B = \frac{M_z}{\nabla} \quad \text{Vertikal oppdriftssenter}$$

$$M_y = \frac{s}{3} SF * (xA_t)' \quad \text{1.ordens moment langsips retning}$$

$$x_B = \frac{M_x}{\nabla} \quad \text{Langsips oppdriftssenter}$$

$$y_B = 0 \quad \text{pga symmetri}$$

Vil man bruke Trapez, så er det bare å erstatte at skrittet deles med 2 og bruke Trapez faktorene

Krengoprøve

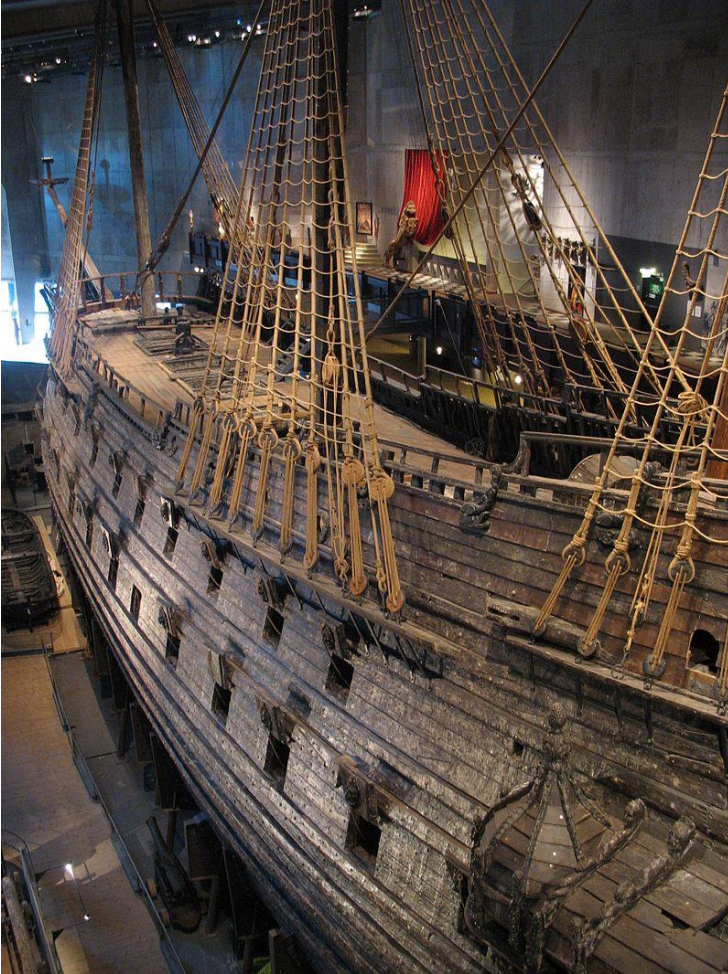
litt historikk og bilder fra ekte krengoprøve

notater for beregninger se NTNU kompendiet

[Til innholdsfortegnelse](#)



Krengesprøvens gjennomførelse historisk



Regalskeppet Vasa

Forliste år 1628

Uproporsjonerlig form for den lasten som skipet skulle bære. Vekt måtte plasseres høyt opp grunnet lite plass i bunn.

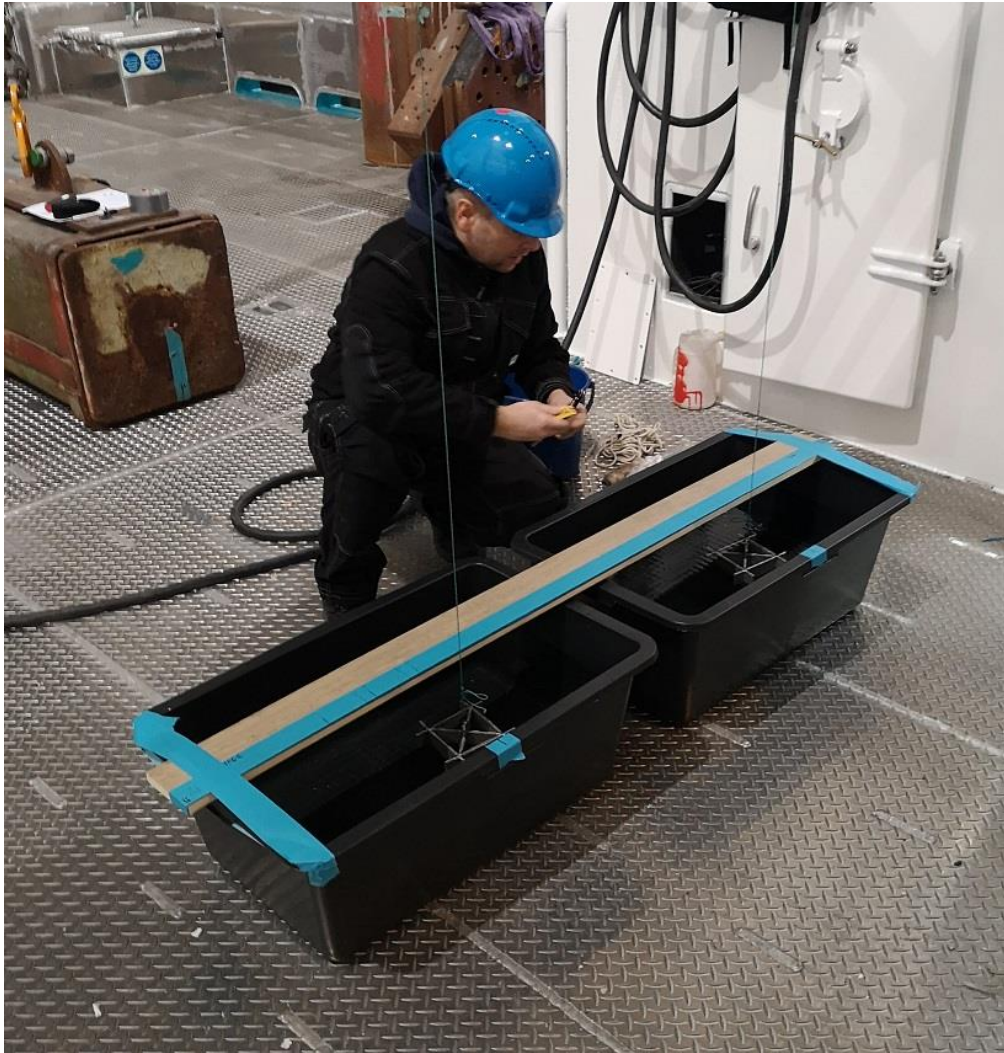
Stabilitetsprøve 1600-tallet:

30 man løper 6 ganger frem og tilbake.

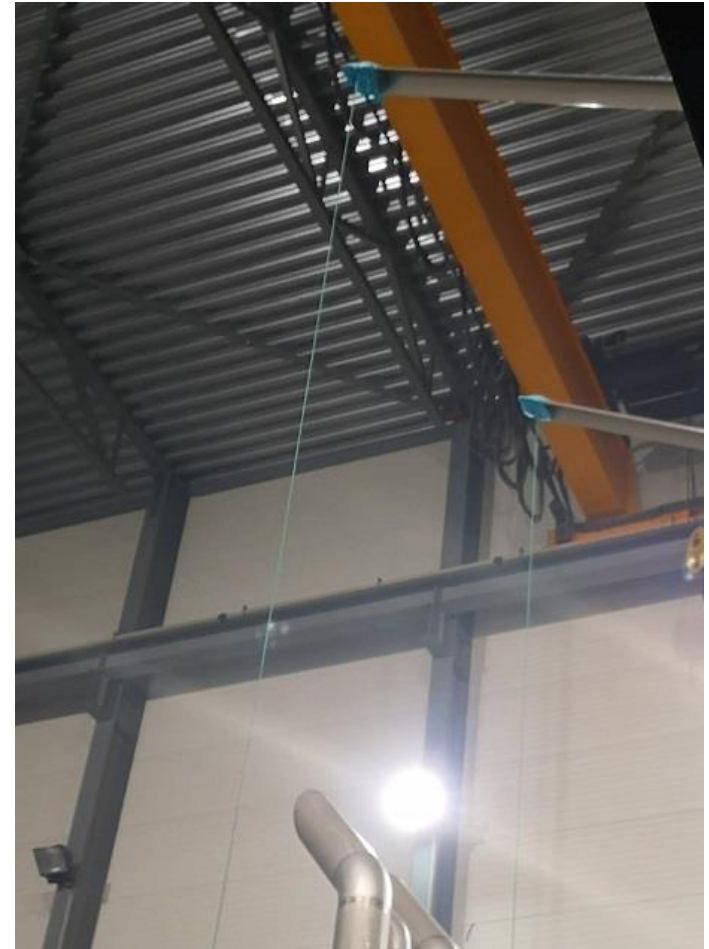
Stor press fra Kongen,
Gustav II Adolf



Ekte krengeprøve

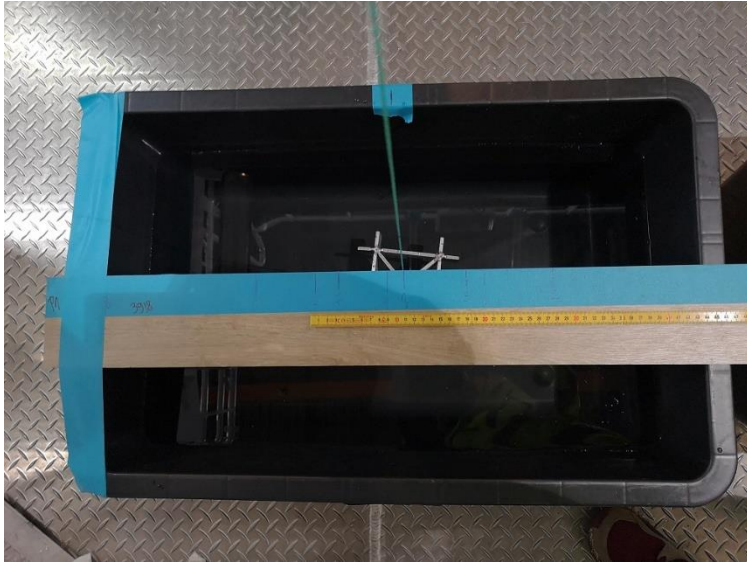


Vannbad eller oljebad + opphengning
snor høyt opp ombord på skip

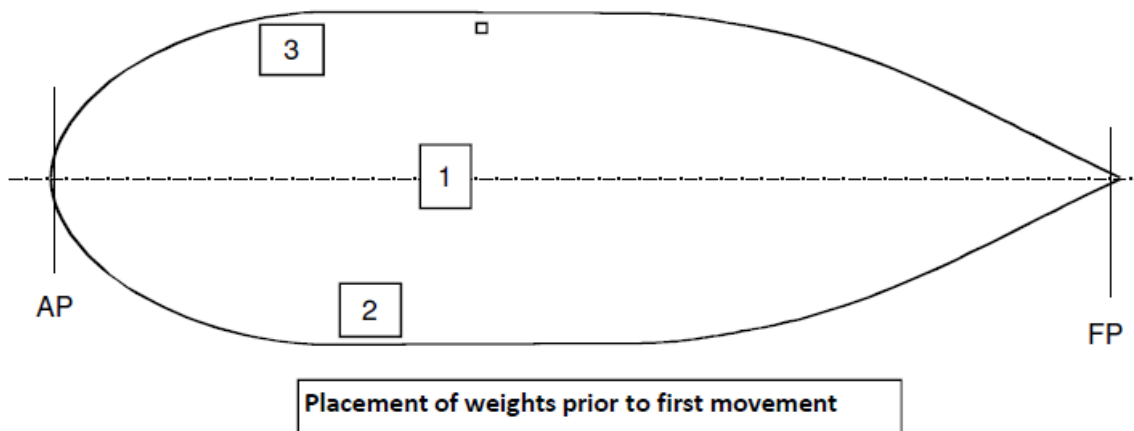


Ekte krengeprøve

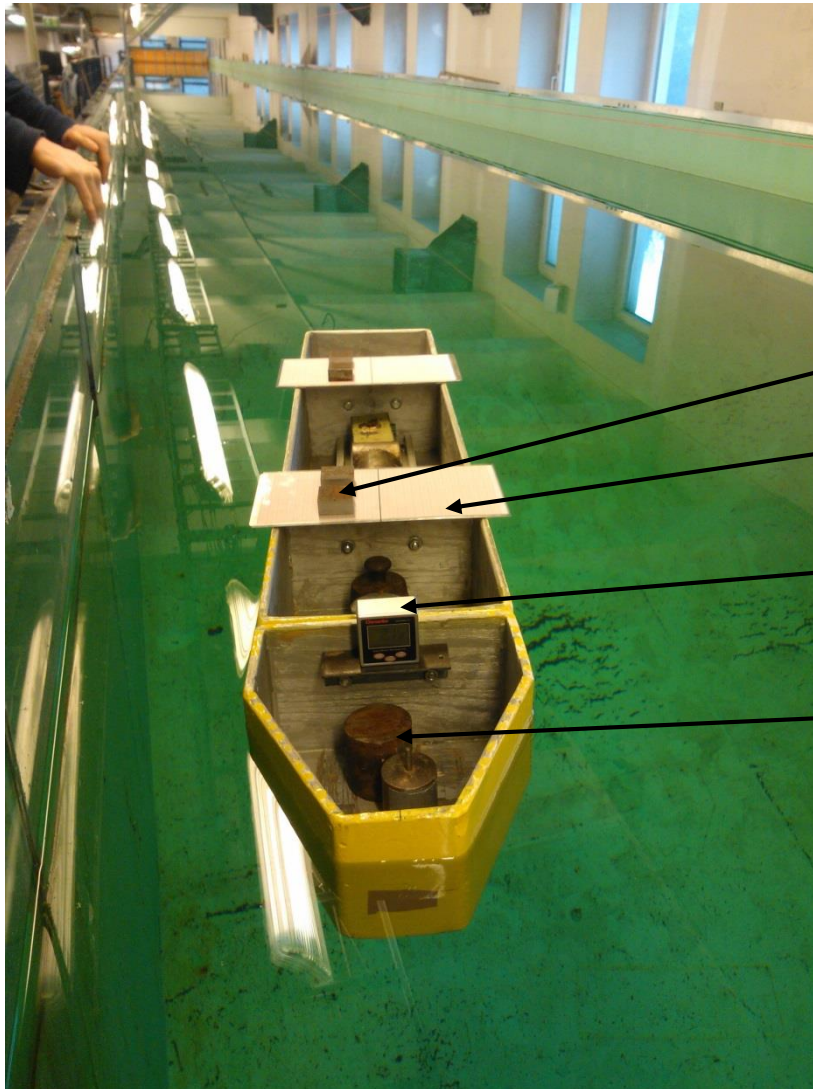
Måling av tangens av vinkelen



Vekter som flyttes til ulike posisjoner i en smart rekkefølge, for å unngå mange løft men likevel få mange ulike momenter



Modellskip for krengeprøve i MAS124



Krengeveker (4x250g)

[mm] - papir

Vinkelmåler

Ballastveker for å få en dypgang, lettskipsdypgang er kun 2 cm ca.
Alle labgrupper legger i vekter selve, altså får alle ulike tyngdepunkt

Instruksjon laste opp LaTeX rapportmal

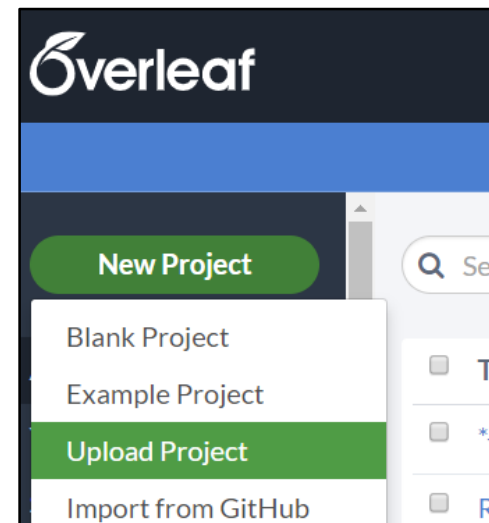
Gå til:

http://home.hib.no/ansatte/gste/ftp/MAS124_Intro_Marinteknikk/Laborasjon/Rapport_skriving/

Last ned:

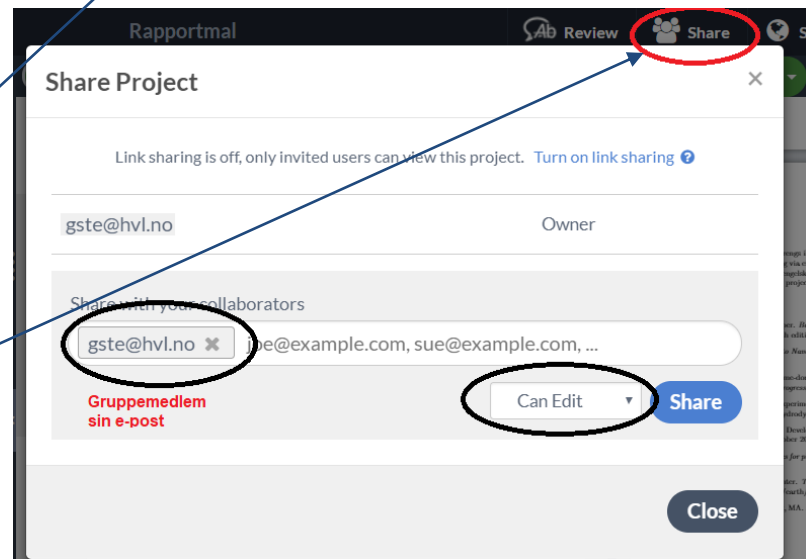
[\[To Parent Directory\]](#)

Monday, March 10, 2014 9:42 AM	3141920 Example_paper.pdf
Monday, March 10, 2014 9:28 AM	288965 Example_paper2.pdf
Monday, October 05, 2015 1:18 PM	2483883 Example_paper DTChull.pdf
Thursday, March 27, 2014 3:00 PM	393726 How to write a paper.pdf
Friday, December 19, 2014 12:54 PM	175956 Litteraturhenvisning ved IMM.pdf
Thursday, March 07, 2019 5:41 PM	1464028 Rapportmal LaTeX.zip
Thursday, March 30, 2017 2:54 PM	268037 Review_sheet.pdf
Thursday, March 07, 2019 5:51 PM	<dir> Word



Gå til:

- www.overleaf.com og lag en konto (alle i gruppen)
- **Én person** i gruppen klikker på New Project -> Upload project
- Klikk inn på prosjektet og dele med din(e) gruppemedlem(mer)



Store krengevinkler

M- kurve, B- kurve, $\overline{GZ}$ -kurve, $\overline{KY}$ -kurve

[Til innholdsfortegnelse](#)



Store krengevinkler

Ved store krengevinkler kan vannlinjearealet og den neddykkede volumen ikke lenger antas være konstant. Metasentret flytter seg fra senterlinjen pga. at oppdriftssenteret flytter seg mye og flotasjonssenter flytter seg ettersom vannlinjearealet endres og samtidig blir usymmetrisk rundt langskips akse.

Tyngdepunktet blir kvar på samme sted og derfor er det fortsatt $\overline{GZ}$ -armen som er av stor interesse for stabiliteten.

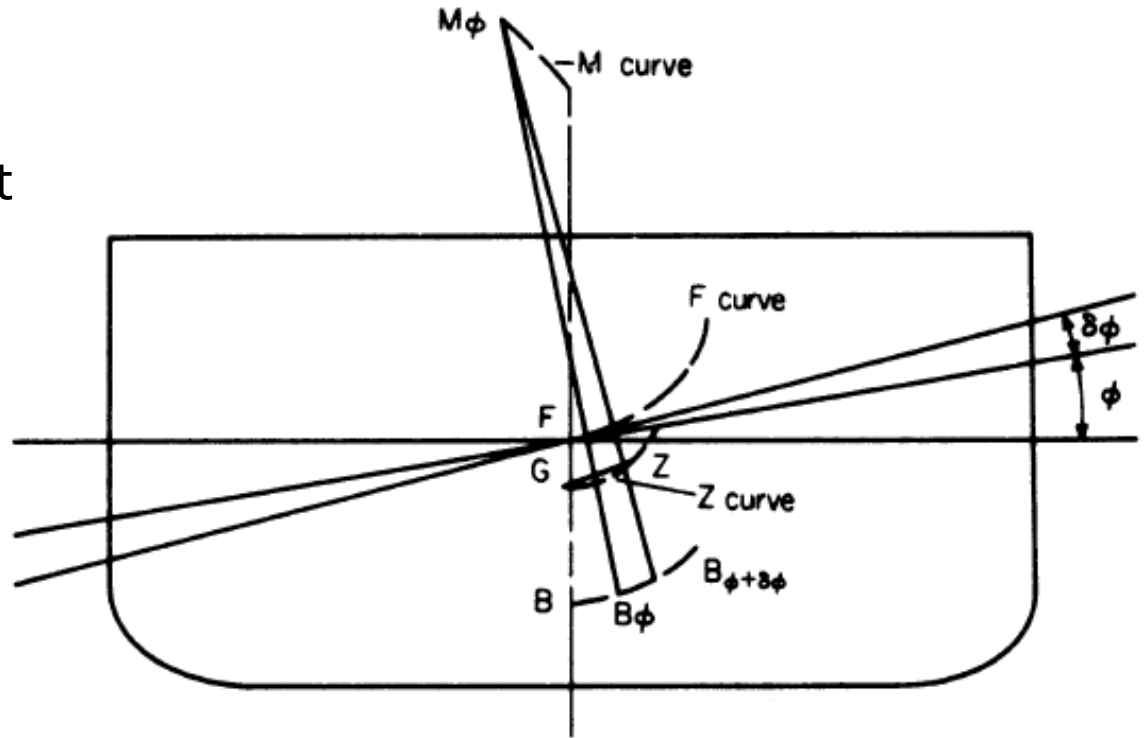
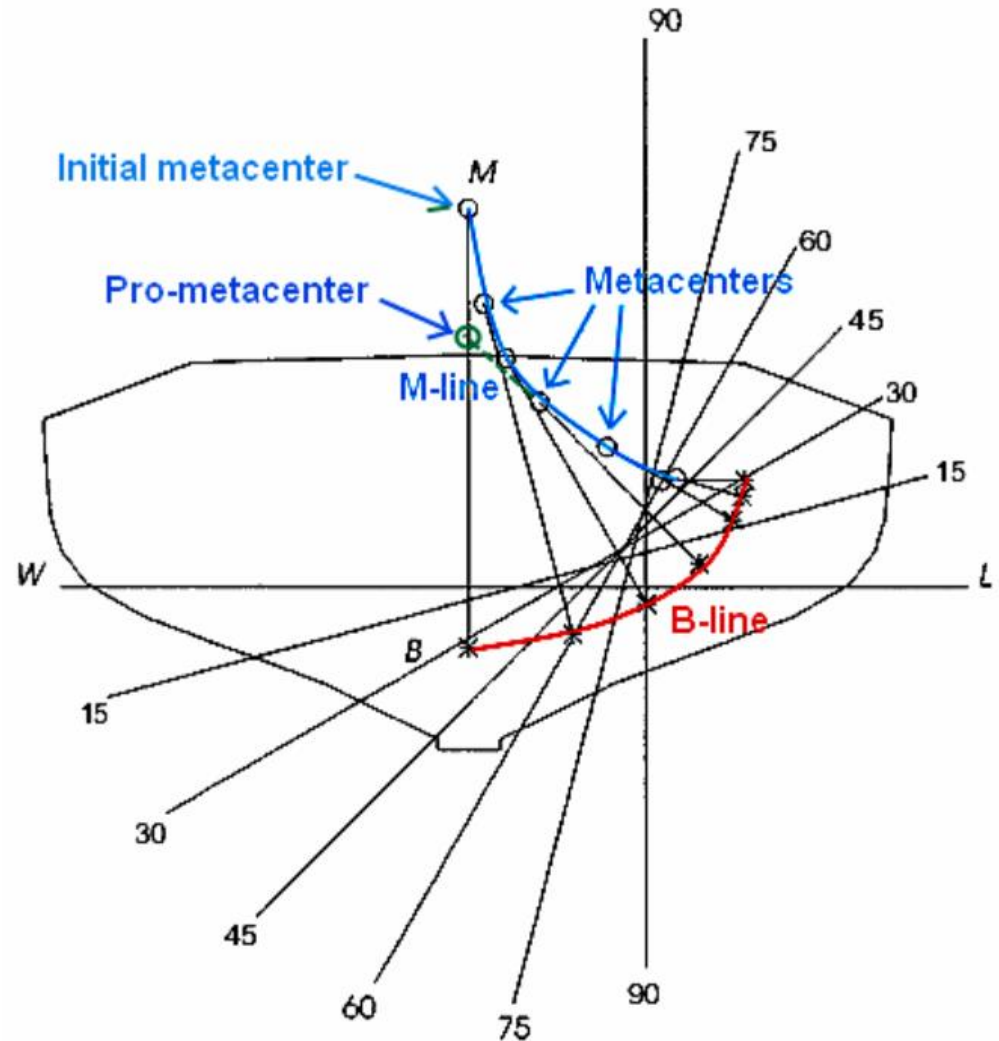


Fig. 4.23 Curves of B, M, F and Z , p. 118 Basic Ship Theory.

B- og M-kurve

Tegner man plasseringen på ny oppdriftssenter for hver krengevinkel så dannes en s.k. *B*-kurve. Metasentret flytter seg sånn at det bildes en *M*-kurve. Geometrisk beskrives *M*-kurven som evolутten (eng: evolute) til *B*-kurven, dvs. kurven som blir resultatet når man tegner senter på kurvaturen i hver punkt for *B*-kurven.



$\overline{GZ}$ som funksjon av fast punkt

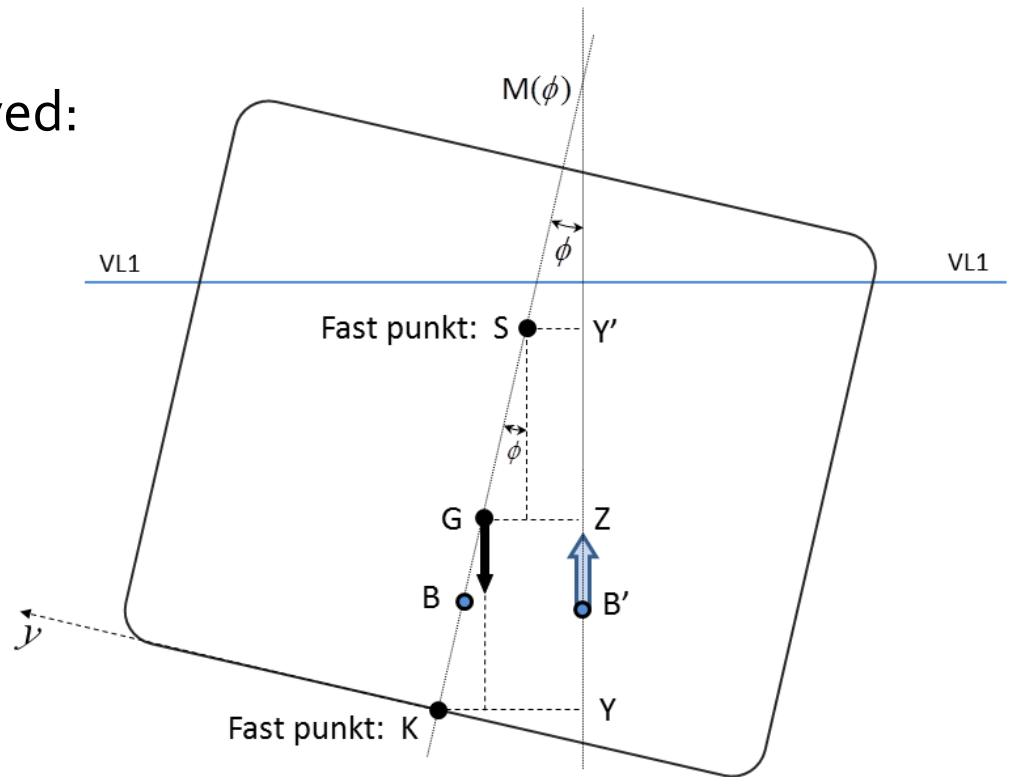
For å kunne tegne hydrostatiske data (plassering på oppdriftssenter) uavhengig av aktuell tyngdepunkt, vil man relatere disse data til en fast punkt på skroget. Dette kan være kjølpunktet K eller en annen godt definert punkt S .

Då kan $\overline{GZ}$ etterpå bestemmes ved:

$$\overline{GZ} = \overline{KY} - \overline{KG} \sin \phi$$

$$\overline{GZ} = \overline{SY'} + \overline{GS} \sin \phi$$

$$\overline{GZ} = \overline{SY'} - \overline{SG} \sin \phi$$



Ref: *Basic Ship Theory* p. 112,
Ship Stab. Masters and Mates p. 176

Krysskurver (KY-kurve, KN cross curves)

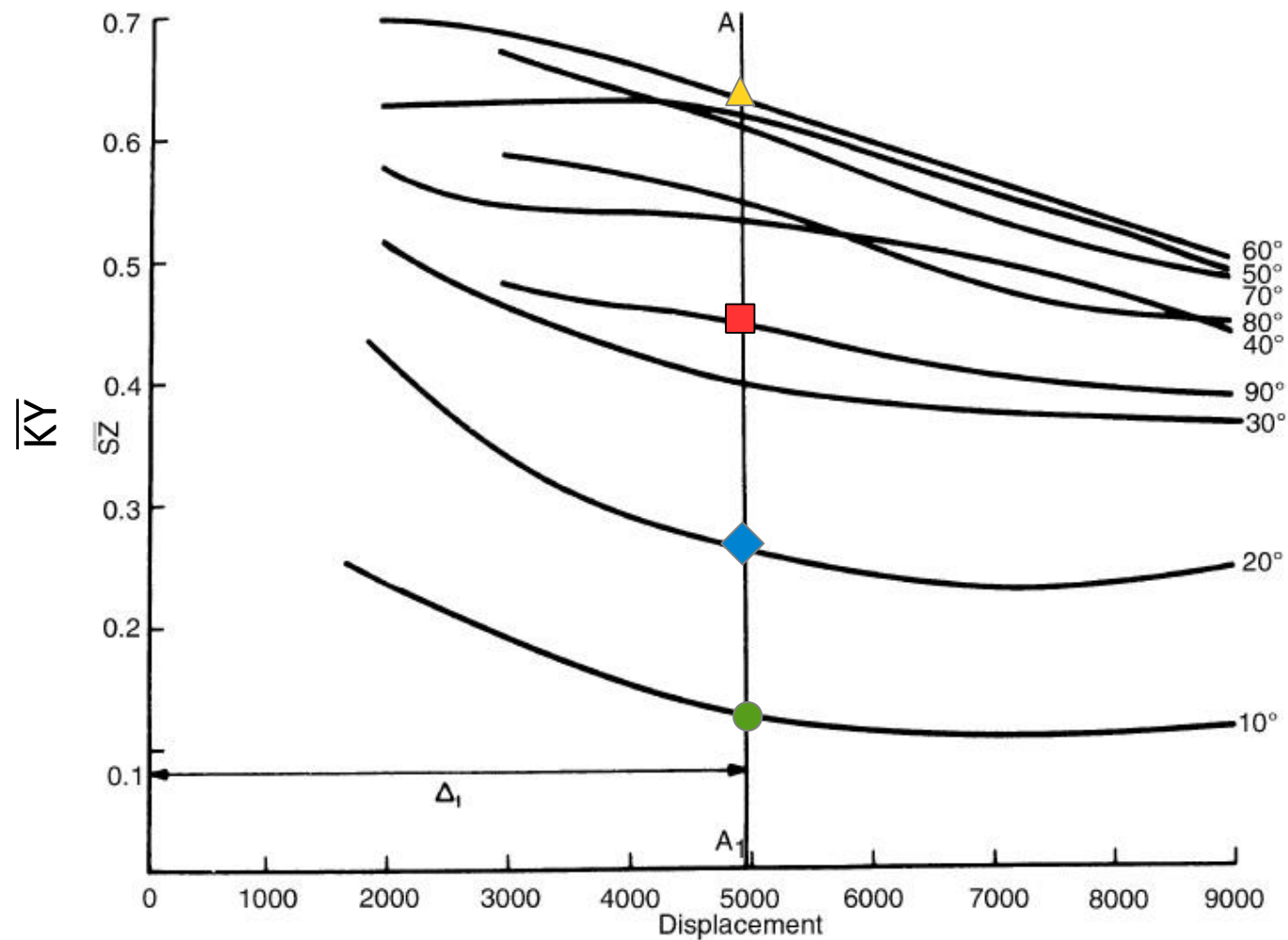
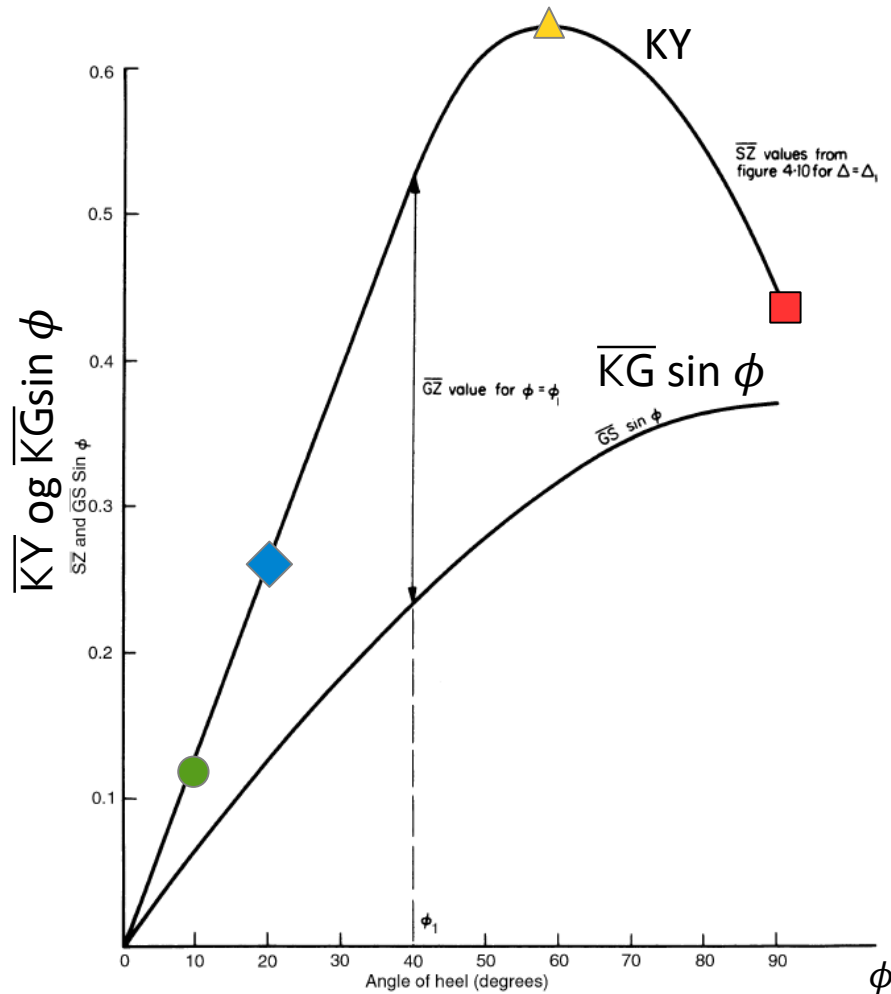


Fig. 4.10, p. 106 Basic Ship Theory.

$\overline{KY}$ kurve ved konstant deplasement

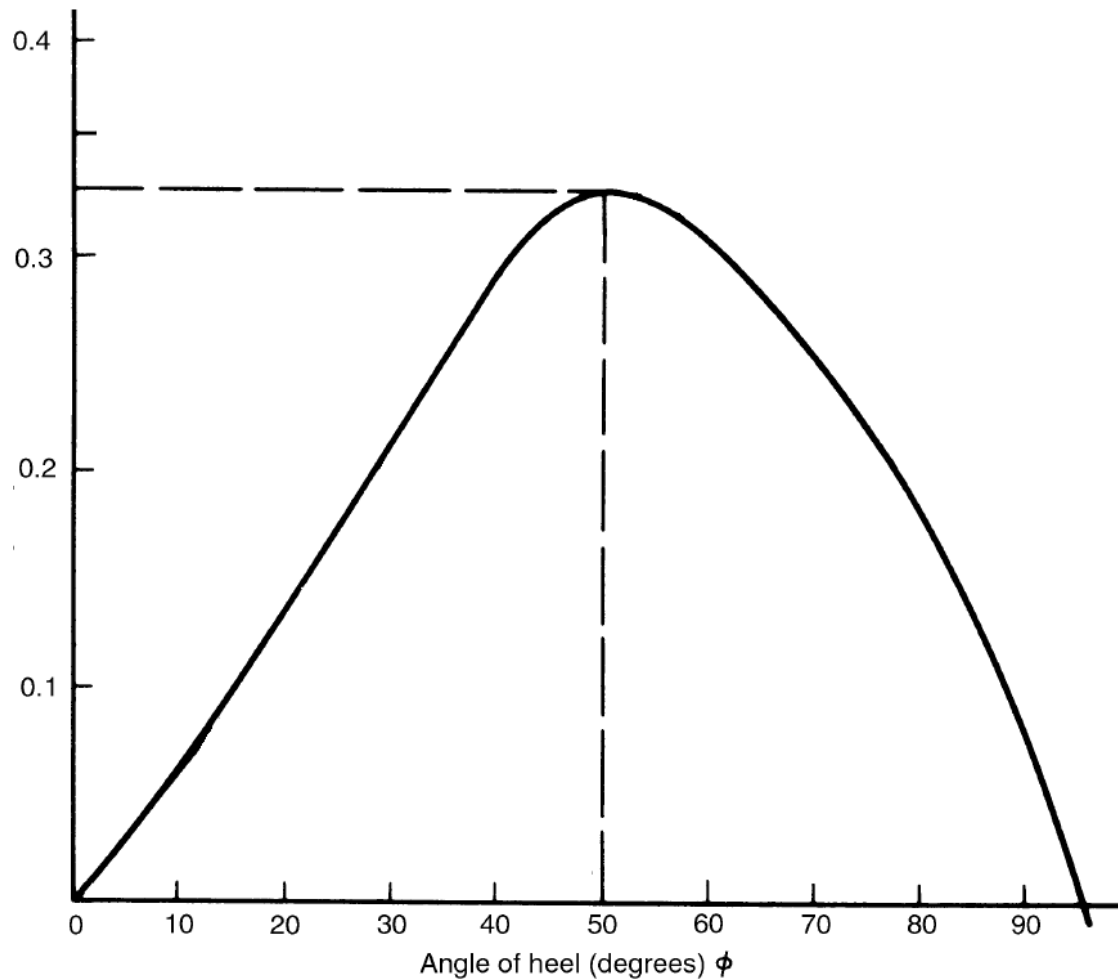


$\overline{KY}$ vs ϕ ved konstant deplasement
(punkter fra seksjon A1-A Fig. 4.10)

$$\overline{GZ} = \overline{KY} - \overline{KG} \sin \phi$$

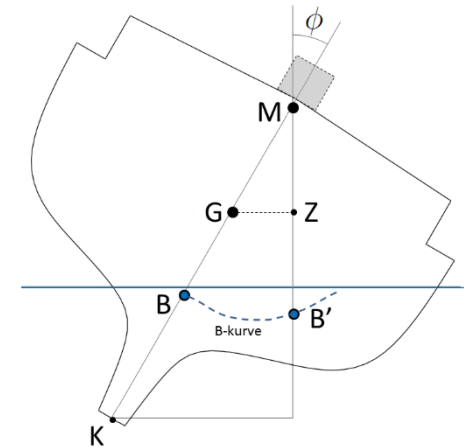
Fig. 4.18, p. 114 Basic Ship Theory.

$\overline{GZ}$ kurven



Konstant $\overline{KG}$, $\Delta(T)$

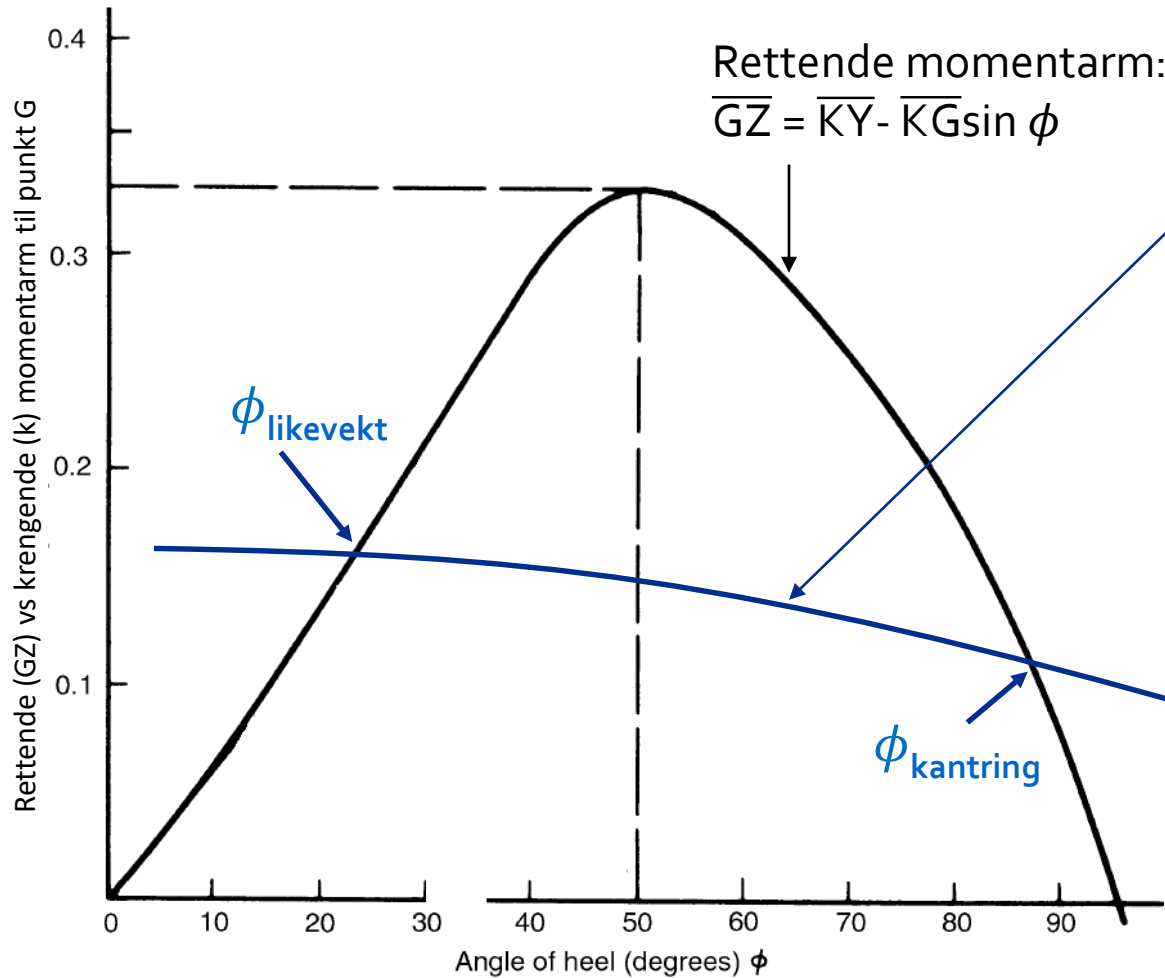
Rettende momentarm:
 $\overline{GZ} = \overline{KY} - \overline{KG} \sin \phi$



p. 113 Basic Ship Theory.

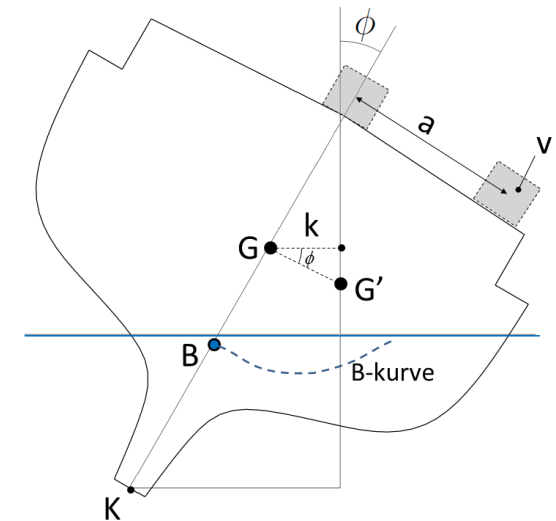
$\phi_{kantring} > 90^\circ$

Rettende og kreggende momentarm



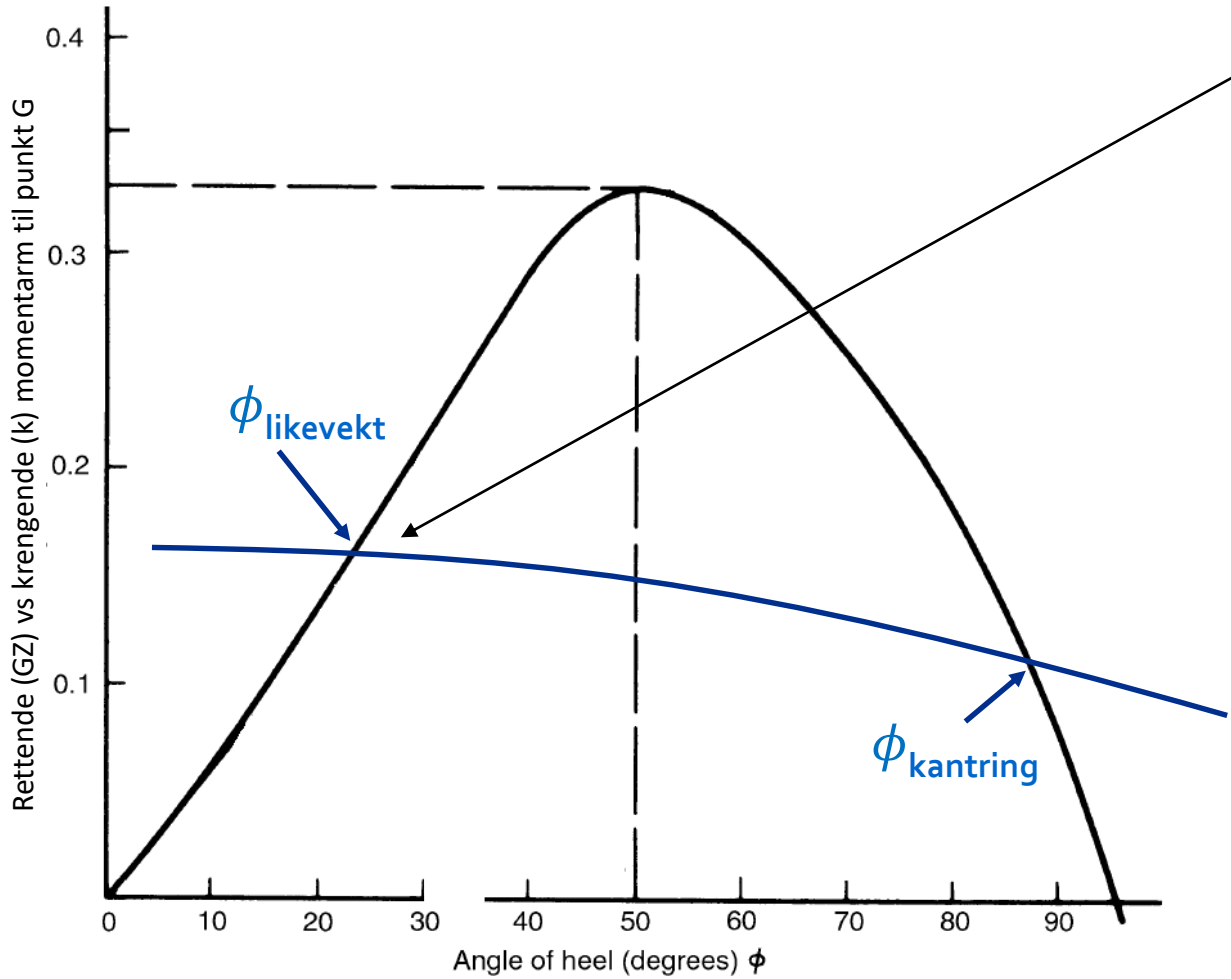
Krengemomentarm k grunnet konstant usymmetrisk last: vind, strøm

$$k = \overline{GG'} \cos \phi$$

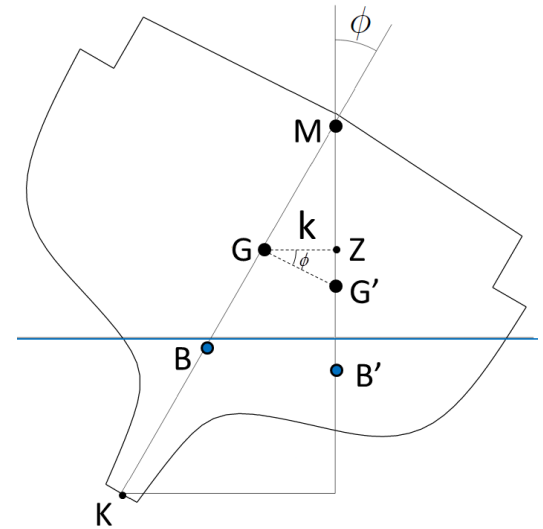


p. 113 Basic Ship Theory.

$\overline{GZ}$ kurve ved konstant tyngdepunktplassering



Ved likevekt:
 $\overline{GZ} = k$
 B' rett under G' !



p. 113 Basic Ship Theory.

$\overline{GZ}$ kurvens egenskaper

O-C: Range of stability. For vinkler innom dette området, vil skipet gå tilbake til opprett tilstand når kilden for det kregende momentet fjernes.

A-B: Maksimalt rettende moment. Dette er proporsjonalt med den største krengevinkel som skipet kan beholde uten å kantre.

H: Ved denne punkt endres kurvaturen på $\overline{GZ}$ -kurven og nær denne vinkel går dekkskanten på et skip ned i vann. For skip med åpent dekk, er dette i de fleste fall likt kantrings vinkelen.

Finne $\overline{GM}$:

- 1) Tegn en tangent til $\overline{GZ}$ -kurven i origo (**OD**).
- 2) Tegn en vertikal linje (**ED**) ved $\phi = 1 \text{ rad} = 57.3^\circ$, som blir lik stigningsgraden på tangent kurven **OD**.
- 3) Les av $\overline{GM}$ på $\overline{GZ}$ -aksen (**F**), der **OD** og **ED** krysses.

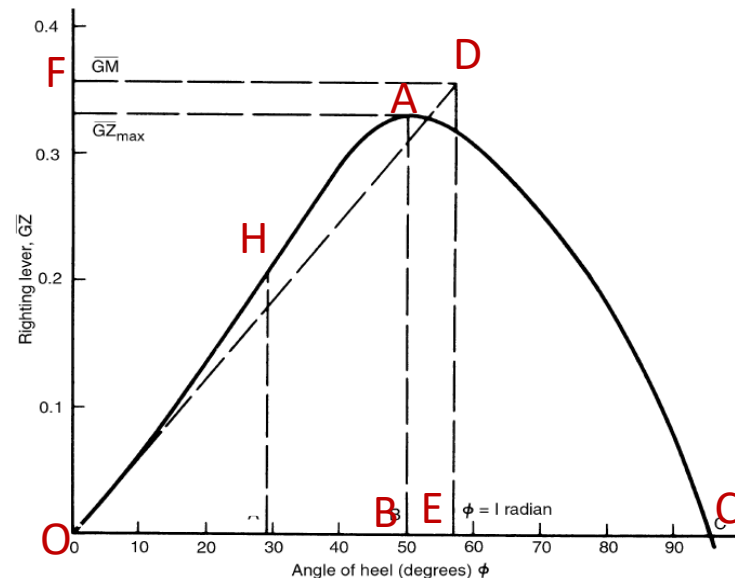
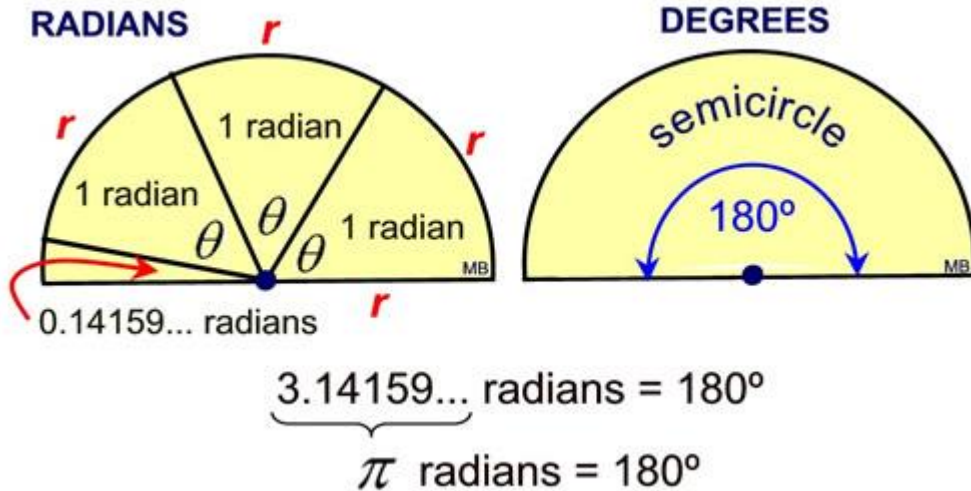


Fig. 4.17 Curve of static stability

Ref: Basic Ship Theory p. 113, Ship Stab. MastersMates p. 176-181

$\overline{GZ}$ kurvens egenskaper



$$3.14 \text{ rad} \triangleq 180 \text{ deg}$$

$$1 \text{ rad} \triangleq ? \text{ deg}$$

$$180 \text{ deg} \times 1 \text{ rad} / 3.14 \text{ rad} = 57.3 \text{ deg}$$

Finne $\overline{GM}$:

- 1) Tegn en tangent til $\overline{GZ}$ -kurven i origo (OD).
- 2) Tegn en vertikal linje (ED) ved $\phi = 1 \text{ rad} = 57.3^\circ$, som blir lik stigningsgraden på tangent kurven OD.
- 3) Les av $\overline{GM}$ på $\overline{GZ}$ -aksen (F), der OD og ED krysses.

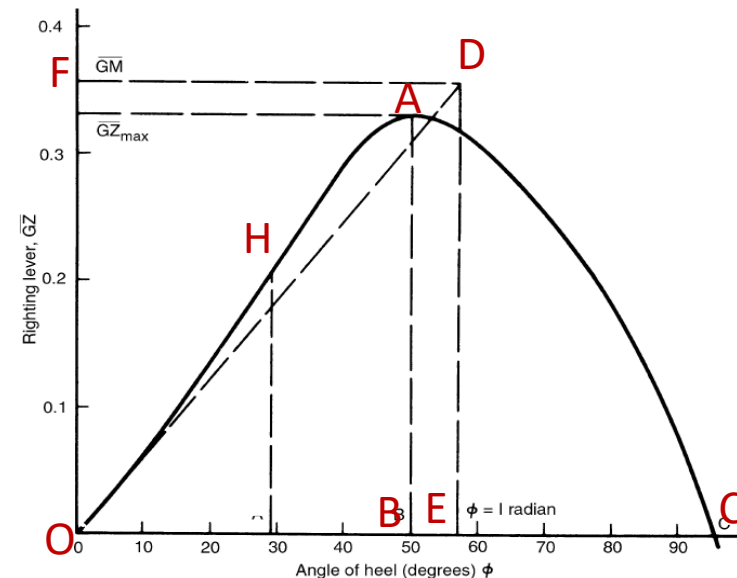


Fig. 4.17 Curve of static stability

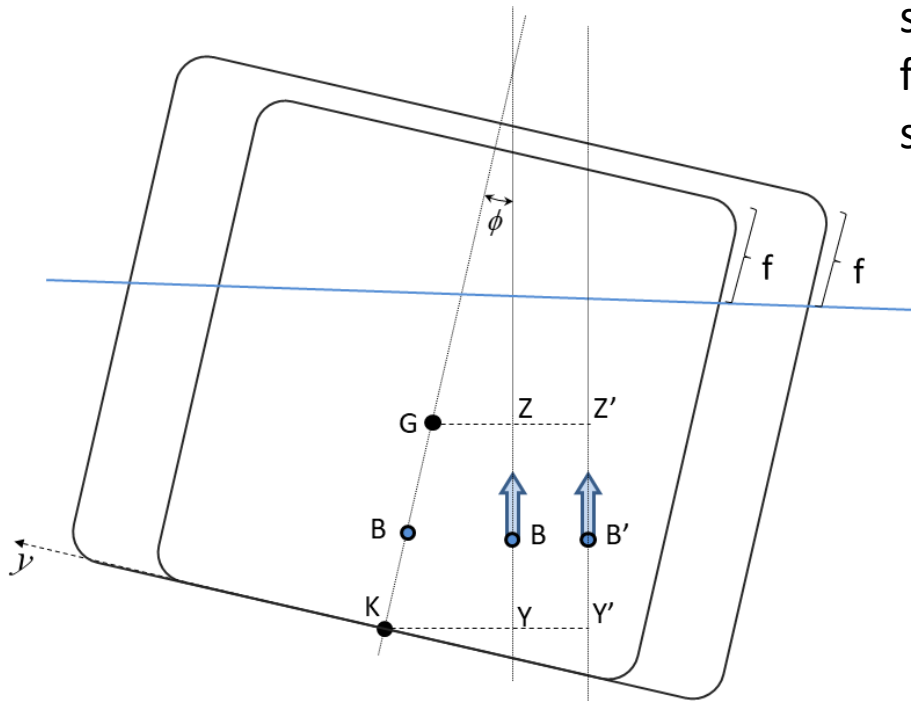
Ref: Basic Ship Theory p. 113, Ship Stab. MastersMates p. 176-181

Vekt- og formstabilitet ved store vinkler

$$\overline{GZ} = \underbrace{\overline{KY}}_{\text{Avhengig av form}} - \underbrace{\overline{KG}}_{\text{Avhengig av vekt}} \sin \phi$$

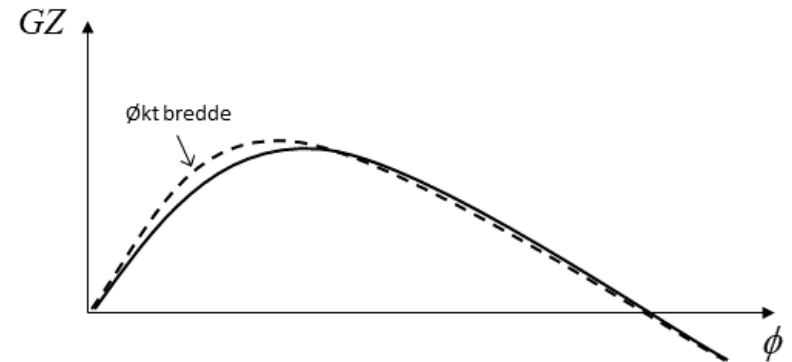
Avhengig
av form

Avhengig
av vekt



Lavere G gir økt rettende moment GZ.

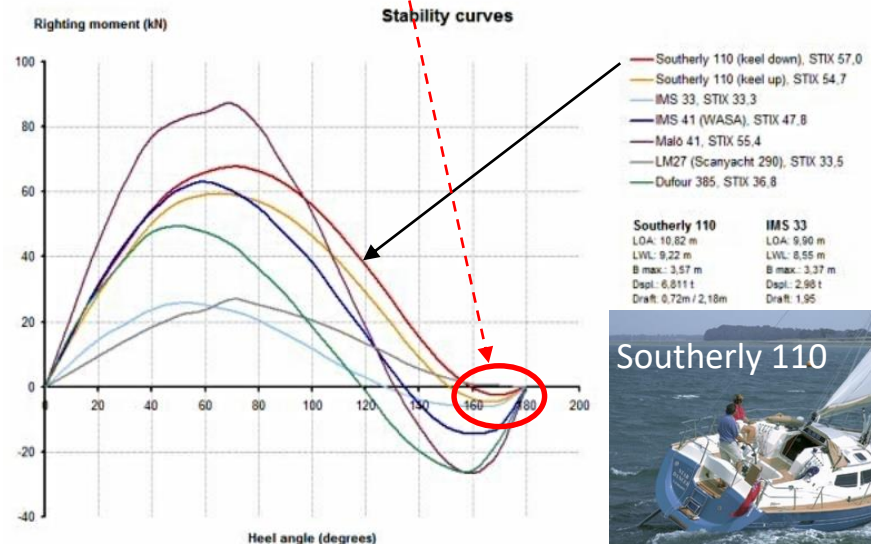
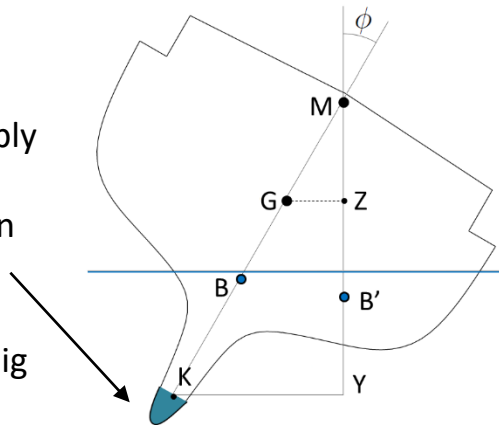
For å øke avstanden KY, må oppdriftssenter kunne bevege seg mere til siden ved krenkning, dette er mulig ved å øke bredde på skipet. Viktig å samtidig tenke på å øke fribordet at fribord ikke blir mindre også ved store vinkler.



Kasseform vs. «seilbåt» form

- Kasseformede skip har god initialstabilitet ved små vinkler men ikke nødvendigvis ved store vinkler, det er avhengig av dybden (D).
- Skip med mere hydrodynamisk form har, slik som en seilbåt vist i bilden under, normalt lavere GM ved små vinkler for å øke manøvrerbarhet av båten, rask å styre.
- Ved store vinkler så bidrar denne buete formen til veldig god stabilitet i krenget tilstand, siden formen gjør at B flytter seg raskt mye mere til høyre enn for en kasseform (se hvordan neddykket volum ser ut i krenget tilstand).
- Seilbåter har typisk kurver som har liten «range of negative stability», se for eksempel rød kurve i grafen under.

Havseiler har dypere kjøll med bly for å øke vektstabilitet uten å redusere hydrodynamisk motstand vesentlig



Korreksjon for fri væskeoverflate effekt

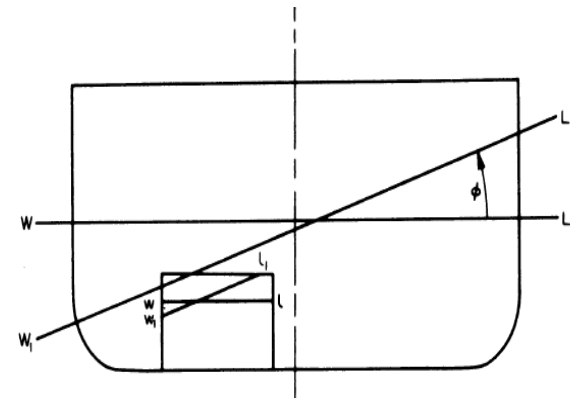
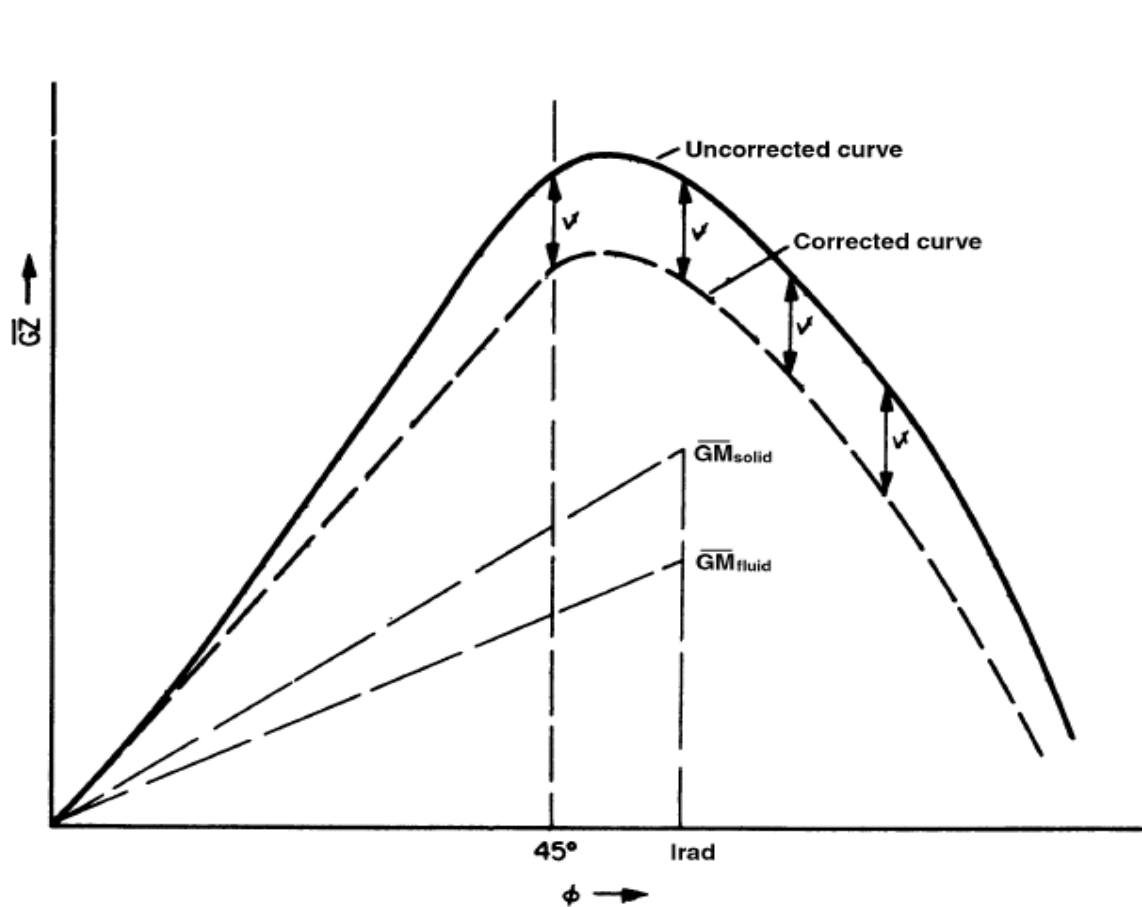
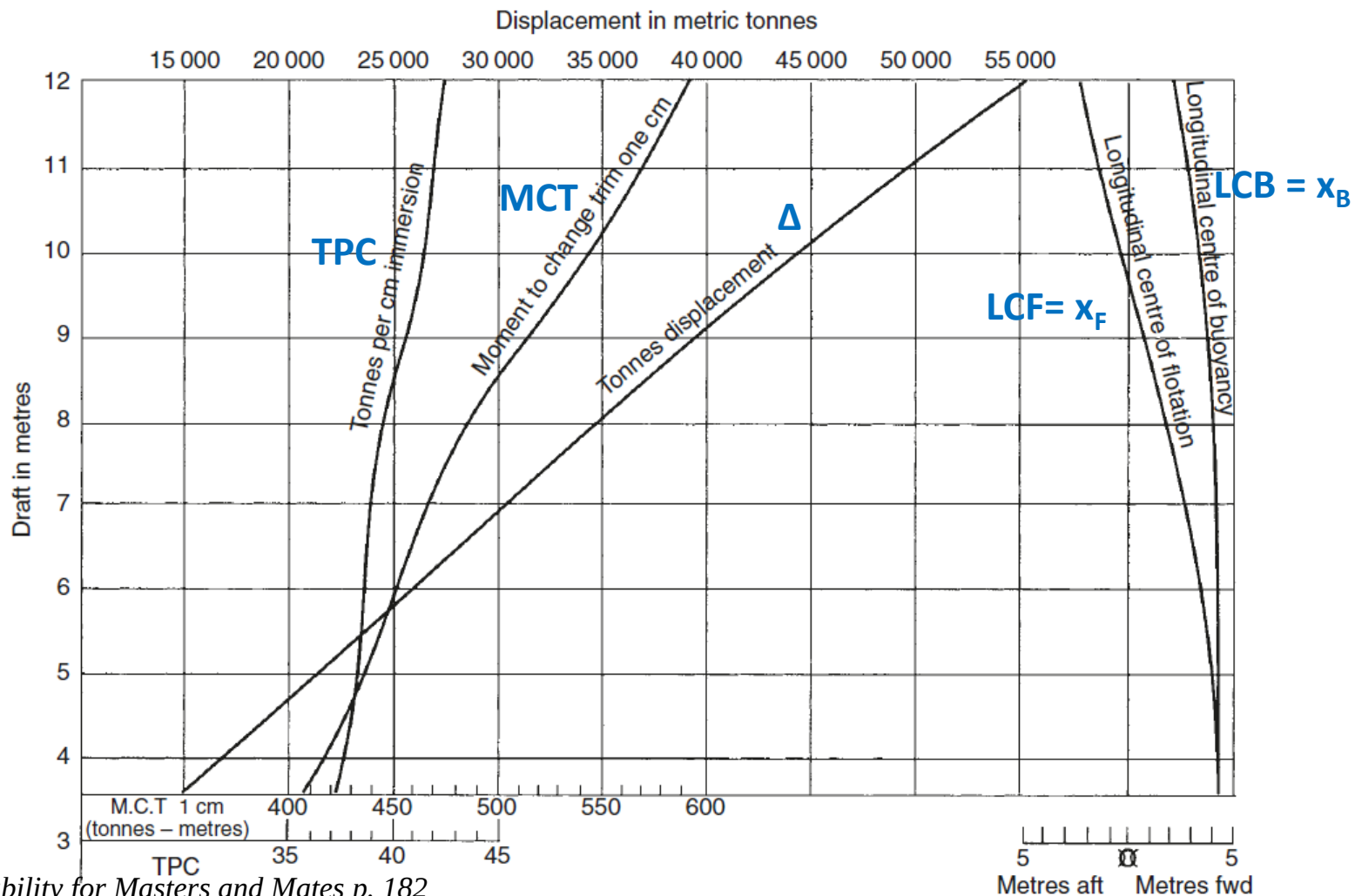


Fig. 4.21 $\overline{GZ}$ curve corrected for free surface p. 117 Basic Ship Theory.

Videre hydrostatiske kurver samlet

GZ- kurven, KY-kryss kurver (KN cross curves) og nå følgende:



Ref: Ship stability for Masters and Mates p. 182



TPC og MTC

TPC – Tonnes per centimeter

$$TPC = \frac{A_w}{100} \rho = \left[\frac{\text{m}^2 \text{ tonn}}{\text{m}^3} \right] = \left[\frac{\text{tonn}}{100 \text{ cm}} \right]$$

MCT – Moment to change trim one centimeter

$$MCT = \frac{\Delta \overline{GM}_L}{100L} = \left[\frac{\text{tonn m}}{\text{m}} \right] = \left[\frac{\text{tonn m}}{100 \text{ cm}} \right]$$

Ref: eksempel fra tavlen MCT, Basic Ship Theory s. 65

Virkning på dypgående ved endring av tetthet – Eks. bruk av TPC

$$\begin{aligned}\Delta_1 &= \rho_1 \nabla_1 \\ \Delta_1 &= \Delta_2 \\ \nabla_1 \rho_1 &= \nabla_2 \rho_2 \quad (1)\end{aligned}$$

For kasseform

$$\begin{aligned}\rho_1 L B T_1 &= \rho_2 L B T_2 \\ T_2 &= \underbrace{\frac{\rho_1}{\rho_2}}_{>1} T_1 \\ &\rightarrow T_2 > T_1\end{aligned}$$

$$\nabla_2 = \delta \nabla + \nabla_1 \quad (2)$$

$$(2) \rightarrow (1) \quad \nabla_1 \rho_1 = (\delta \nabla + \nabla_1) \rho_2$$

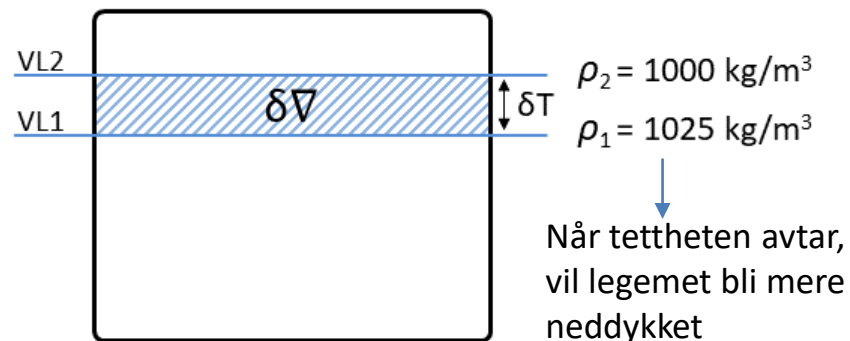
$$\delta \nabla \rho_2 = \nabla_1 (\rho_1 - \rho_2) \quad (3)$$

$$\text{TPC}_1 = \frac{A_{w1}}{100} \rho_1 \quad \text{og} \quad \text{TPC}_2 = \frac{A_{w2}}{100} \rho_2$$

$$(5) \text{ gir } \frac{\text{TPC}_1}{\text{TPC}_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \rightarrow \text{TPC}_2 = \frac{\rho_2}{\rho_1} \text{TPC}_1 \quad (6)$$

$$(3) = (4) \quad \delta T_{cm} \text{TPC}_2 = \nabla_1 (\rho_1 - \rho_2) \quad (7)$$

$$(6) \rightarrow (7) \quad \delta T_{cm} \frac{\rho_2}{\rho_1} \text{TPC}_1 = \nabla_1 (\rho_1 - \rho_2)$$



Når δT er liten gjelder også:

$$\delta \nabla \rho_2 = \delta T \frac{100}{A_{w2}} \frac{\rho_2}{100} = \delta T_{cm} \text{TPC}_2 \quad (4)$$

$$A_{w1} \approx A_{w2} \quad (5)$$

$$\begin{aligned}\rho_2 &= 1.0 \text{ tonn/m}^3 \\ \rho_1 &= 1.025 \text{ tonn/m}^3 \\ \Delta \text{ må angis i [tonn]}\end{aligned}$$

$$\delta T_{cm} = \frac{\nabla_1 (\rho_1 - \rho_2) \frac{\rho_1}{\rho_2}}{\text{TPC}_1}$$



Stabilitetskriterier

krav på initialstabilitet, $\overline{GZ}$ -kurvens forløp og arbeid, $\overline{KG}$ -grensekurve

Referanser: Se *Stabilitetskriterier.pdf* på Canvas under Notater, IMO intact stability code side 11 Ch 2.1-2.2, LOVDATA forskrift FOR-1991-12-20-878 og DNV regelverk *DNV-OS-C301 og DNVGL-RU-SHIP-Pt3Ch15*

[Til innholdsfortegnelse](#)



Standarder- Forskrifter - Rekommandasjoner

IMO – International Maritime Organisation

UN-organ som setter regler for internasjonal skipsfart med hensyn til Sikkerhet og Miljø. Ca 176 land er medlemmer. Mest relevant dette fag er International code on intact stability IMO MSC.267(85) 2008, søkes via Internasjonale konvensjoner Sjøfartsdirektoratet. Offshore Drilling Units, se IMO MODUS.

Sjøfartsdirektoratet

I tillegg til internasjonale regler (IMO) så finner man her nasjonale lover og forskrifter i meny [Regelverk](#). Forskrift «Bygging av skip» og «Stabilitetsforskriften» er mest relevant for dette fag, refererer til LOVDATA Nærings- og fiskeridepartementet.

Standarder- Forskrifter - Rekommandasjoner

DNVGL

Klassifiserer/Sertifiserer skip og setter nye standarder (f.eks. installasjon batterier om bord, operasjoner vind turbiner etc). Har detaljerte rekommandasjoner og beregningsformler for ingeniører. Følges disse, så kan skipet klassifiseres/sertifiseres via DNVGL. Andre klassifiseringsselskap er mulige å bruke også, da bruker man deres regelverk for beregninger. God side å søke i regelverk er her <https://www.dnvgl.com/rules-standards/>

ITTC - International Towing Tank Conference

En klynge av organisasjoner som eier slepe/bølge tank fasiliteter rundt om i verden. Jobber med å forutse hydrodynamiske egenskaper på skip ved eksperiment og validering med simuleringsprogrammer. Gir ut dokumenter med rekommandasjoner for hvordan gjennomføre tester/simuleringer slik at sammenligning forenkles mellom ulike testanlegg. Disse dokumenter blir relevante i hydrodynamikk faget og hvis det blir bacheloroppgave på MarinLab, se [ITTC Register](#) med linker.



Søk etter standarder via DNVGL

Begynn nasjonalt DNVGL Rules & Standards siden og søk på for eksempel:



DNV GL RULES AND STANDARDS

Find document

wind

Se etter en standard der du tror noe om stabilitet er inkludert. Her er to søk der det ikke er så mye ferdig utviklede standarder for stabilitet, her kan du bidra i fremtiden å utarbeide retningslinjer for nye næringer offshore!

Søkord: Wind -> -> DNVGL-ST-0119 Sec. 10

Fish -> DNVGL-RU-OU-0503 Ch3 Sec. 6

Eller søk generelt i menyene:



Maritime



Oil and Gas



Energy

Dynamisk Stabilitet

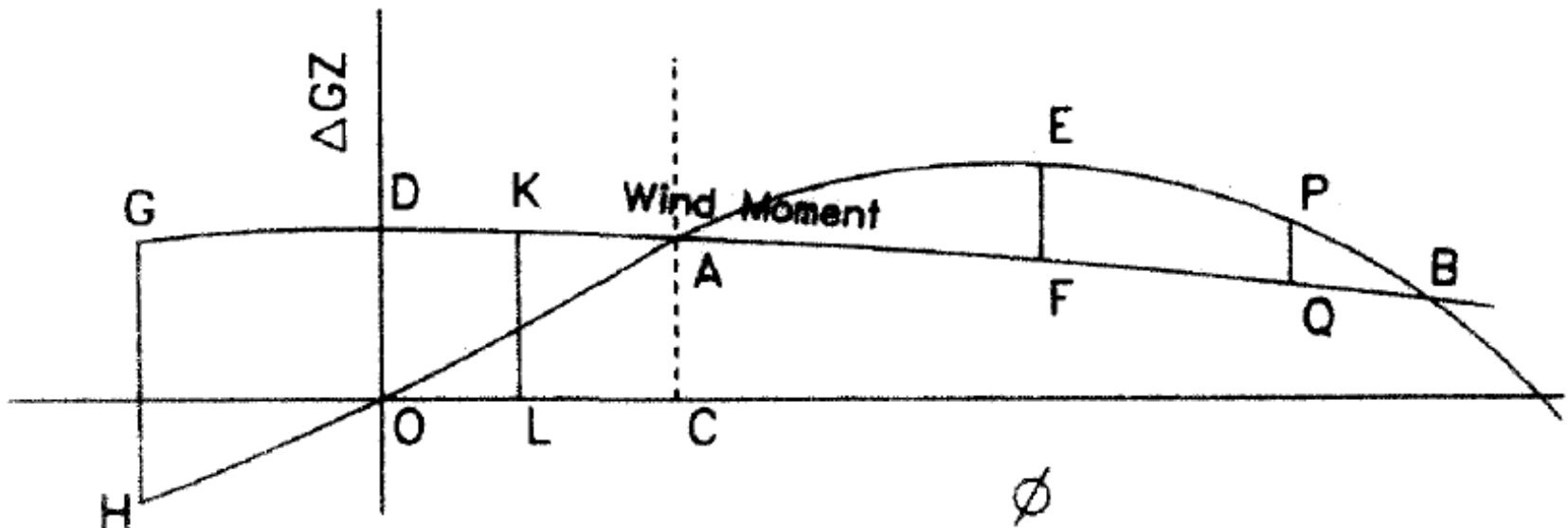
vindens påvirkning, lagret energi i GZ-kurve

Referanser: IMO intact stability code side 12-16 Ch 2.3, LOVDATA forskrift FOR-1991-12-20-878 og DNV regelverk *DNV-OS-C301* og *DNVGL-RU-SHIP-Pt3Ch15*

[Til innholdsfortegnelse](#)



Påvirkning av vind og vindkast (gust) - Dynamisk stabilitet



Ref: Intro Nav Arch, p. 71

Krav på GZ kurve ved vind og vindkast (gust)

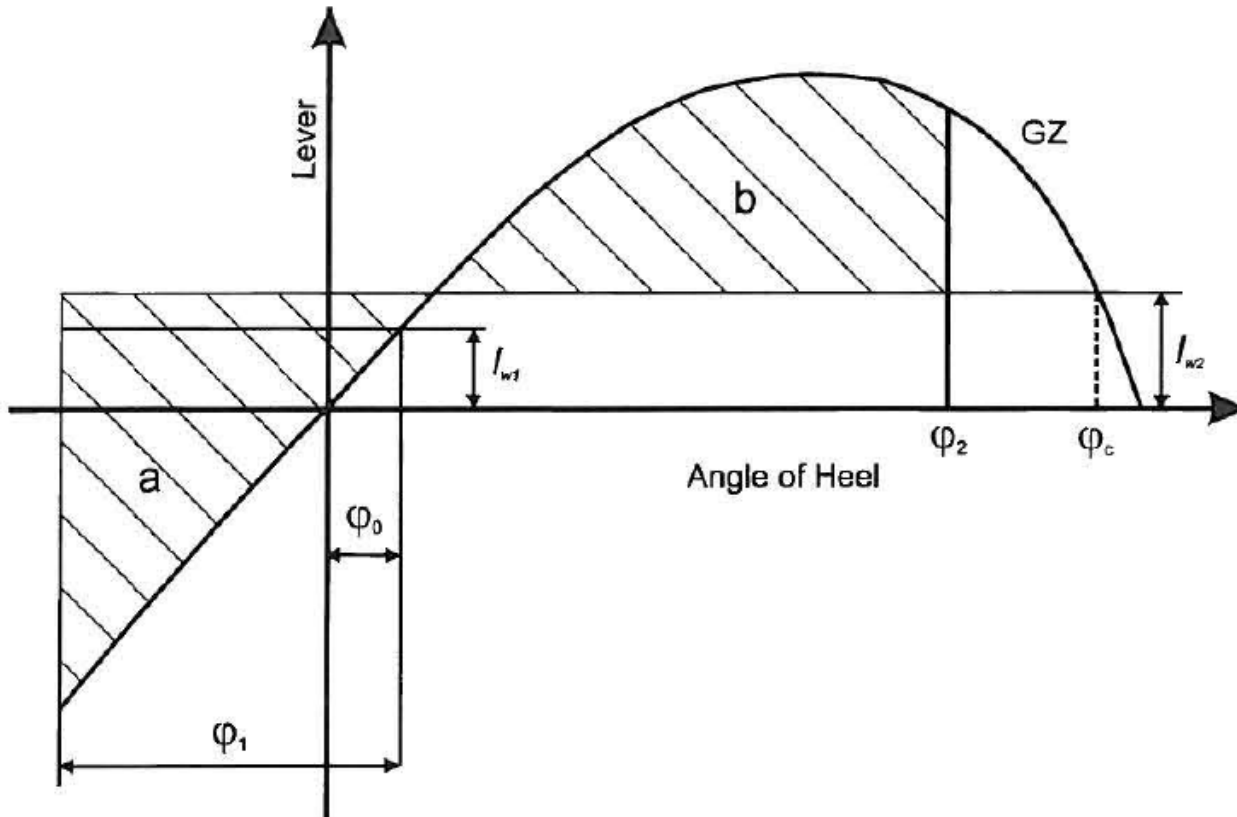


Figure 2.3.1 – Severe wind and rolling

Ref: IMO intact stability code p. 12-16, ch 2.3 eller informasjon i LOVDATA og DNV-OS-C301

Bilge keel for mindre rullbevegelse

Skipets utforming påvirker beregningene for stabilitetskrav på GZ kurve med vindforhold.

Bilge keel er noe som demper rullebevegelse for eksempel. Også avrundet eller kantete skrogform gjør forskjell, følg standardverdier som er gitt i IMO eller forskrifter



Fullt neddykket legeme

rettende arm, styring, hydrostatisk kraftbalanse

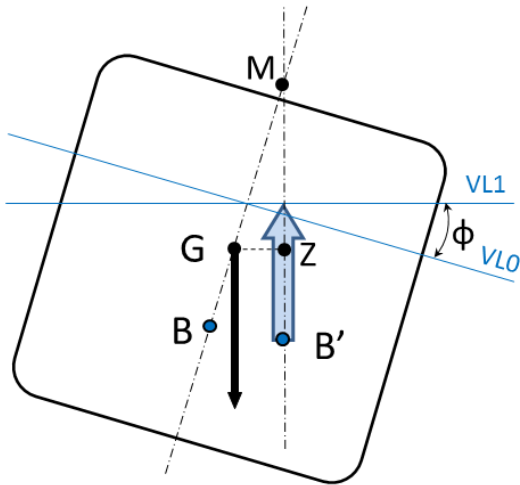


[Til innholdsfortegnelse](#)

Rettende arm

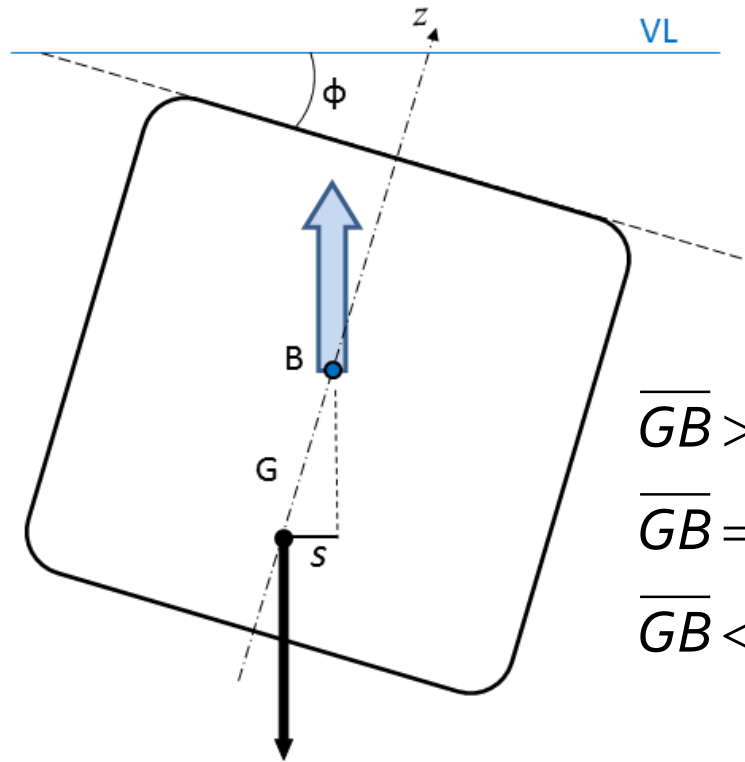
Repetisjon: rettende arm med vannlinje små vinkler:

$$\overline{GZ} = \overline{GM} \sin \phi$$



Rettende arm fullt neddykket:

$$s = \overline{GB} \sin \phi, \quad BM = 0$$



$\overline{GB} > 0$, stabilt

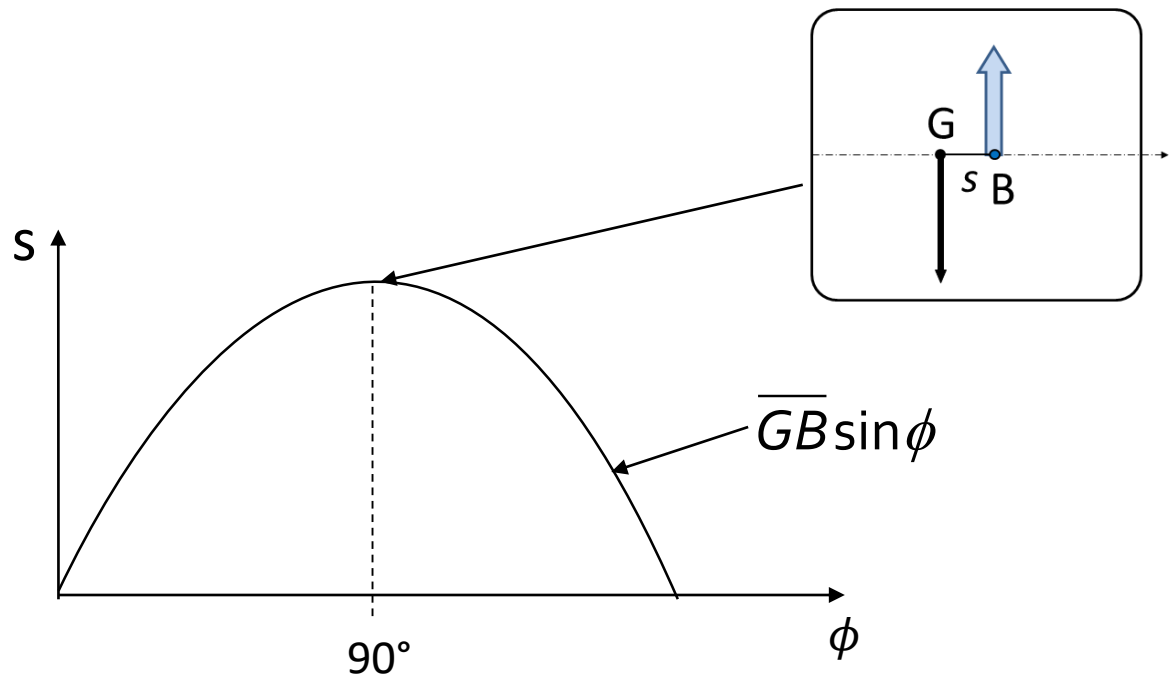
$\overline{GB} = 0$, neutralstabilt

$\overline{GB} < 0$, ustabilt

Oppdriftssenter vill også ligge i ro!

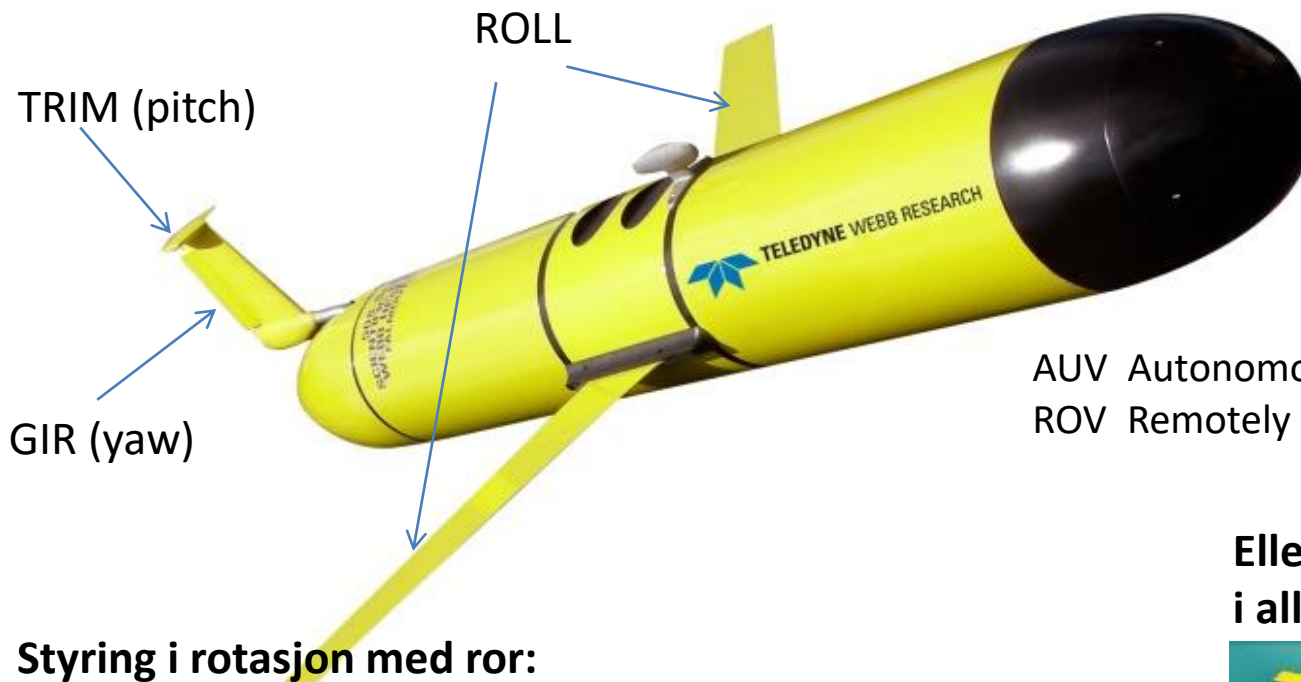
Store vinkler

Maksimal rettende arm: $s_{\max} = \overline{GB}$



Ref: Introduction to naval architecture, submerged bodies, submarines, several pages, see index.

Styring



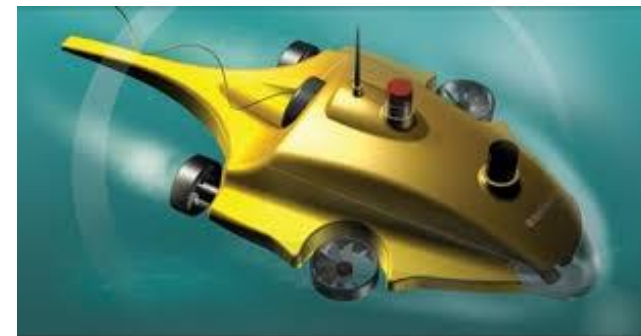
AUV Autonomous Underwater Vehicle
ROV Remotely Controlled Underwater Vehicle

Styring i rotasjon med ror:

- Horisontalt ror bak for trim
- Vertikalt ror bak for gir
- Ailerons på vingene for roll, et ror går ned og på den andre vingen opp, eller hele vingen roterer

Styring fremover med thruster eller glidevinkel

Eller bruk av thrusters
i alle frihetsgrader



Vertikal posisjon bestemmes av tetthet

Statisk likevekt via kraftbalanse mellom tyngde og oppdrift:

$$mg = \nabla \rho g$$

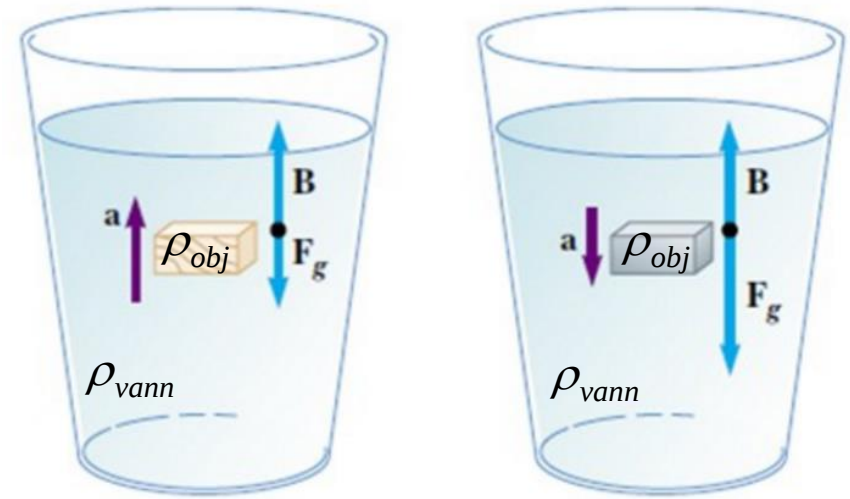
For homogent materiale og helt neddykket legeme:

$$m = V_{obj} \rho_{obj} \quad V_{obj} = \nabla \text{ Volum objekt} = \text{Fortrengt væskevolum}$$

$$\cancel{V_{obj} \rho_{obj} g} = \cancel{\nabla \rho g}$$

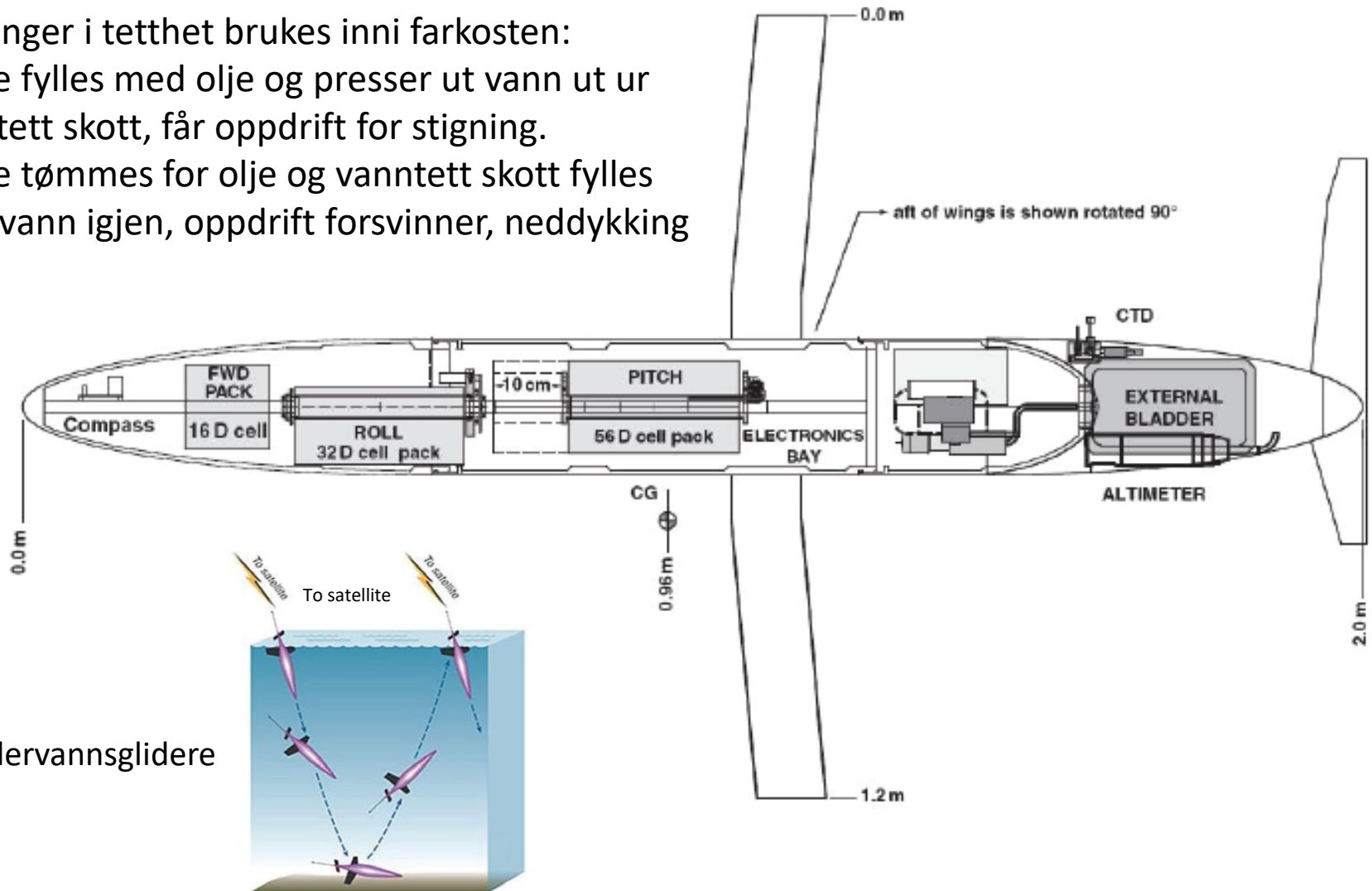
➡ Tetthet må være lik ved likevekt

- $\rho_{obj} < \rho_{vann}$ Legemet heves
- $\rho_{obj} > \rho_{vann}$ Legemet synker
- $\rho_{obj} = \rho_{vann}$ Legemet ligger i ro



Blæreteknikk for vertikal styring undervann

Endringer i tetthet brukes inni farkosten:
Blære fylles med olje og presser ut vann ut ur vanntett skott, får oppdrift for stigning.
Blære tømmes for olje og vanntett skott fylles med vann igjen, oppdrift forsvinner, neddykking



Undervannsglidere

Trykk på dybde

Kraft jevnt fordelt over et areal

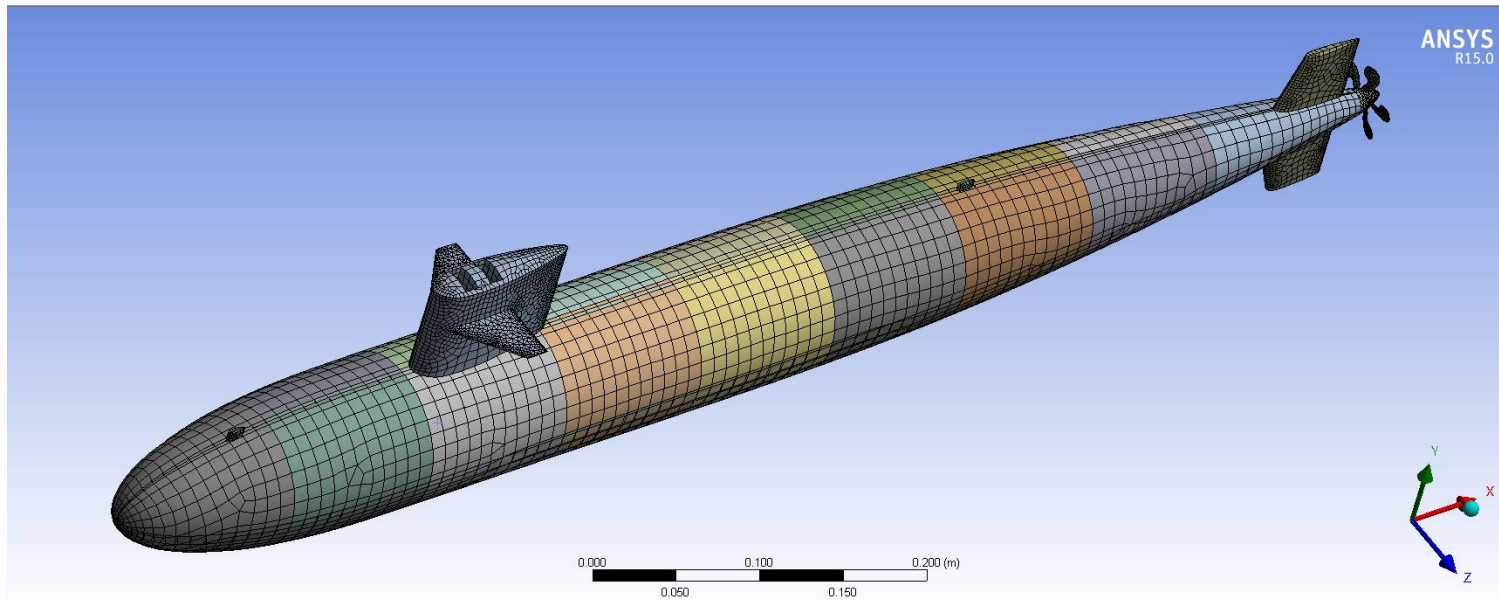
$$P = \rho gh + p_{atmosphere}$$

$$F = PA$$

Strukturanalyse må gjøres for å se at konstruksjonen klarer trykket.

Typisk FEM – **Finite Element Method**

Programvare som er vanlig er ANSYS, Abaqus, NASTRAN.



Skadestabilitet

angle of loll, vannfylling, grunnstøting ('beaching', dokking),
lost buoyancy method

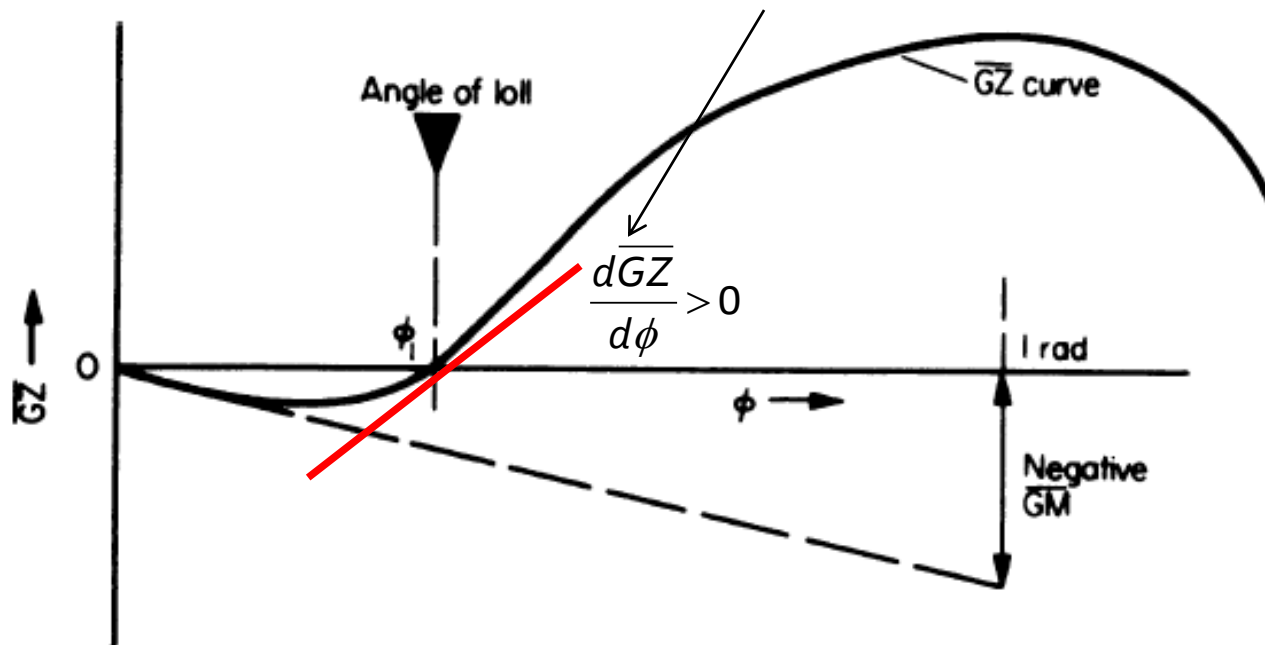
‘En ingeniør som regner på skadestabilitet har som hovedoppgave å holde skipet over vannlinjen så lenge som mulig etter skade, sånn at personer om bord rekker å redde seg selv eller bli reddet. I beste fall skal skipet klare mange vannfylte områder uten å kantre, samt klare lettere grunnstøting uten hull i skrog eller oljetanker.’

[Til innholdsfortegnelse](#)



Angle of loll

I noen tilfeller kan skipet ha en liten negativ verdi på GM, dvs at G ligger noe over M og skipet vil krenge mer og mer. Når skipet begynner å krenge flytter seg oppdriftsenter sidledes og når avstanden GM er liten, så finner skipet et likevektstilstand når B har havnet rett under G. Då legger seg skipet i en liten vinkel ulik null på antingen styrbord eller babord side, def: angle of loll. Skipet vil generelt stabilisere seg kring en vinkel der $\overline{GZ}$ -kurven krysser null med positiv stigningsgrad:



Intreffer typisk ved GM verdier på -0.05m, -0.1m langt under stabilitetskravet: $GM_{\min} > 0.15\text{m}$

God grafisk forklaring av B forflyttingen i Ship Stability for MastersMates s. 49

Ref: Basic ship Theory p. 115, Ship Stab. MastersMates p. 49, p. 178

Extreme angle of loll

2004 kom nye regler at skip må bytte ut ballastvann for å forhindre spredning av skadelige organismer.

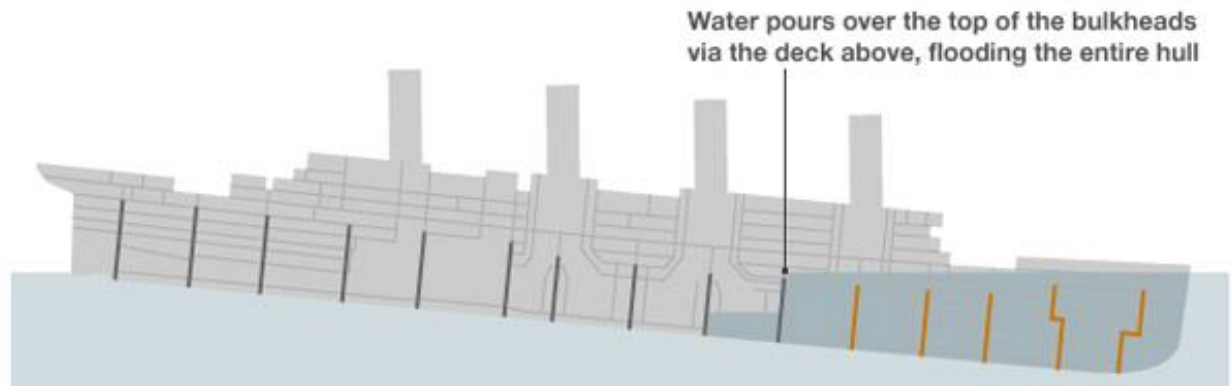
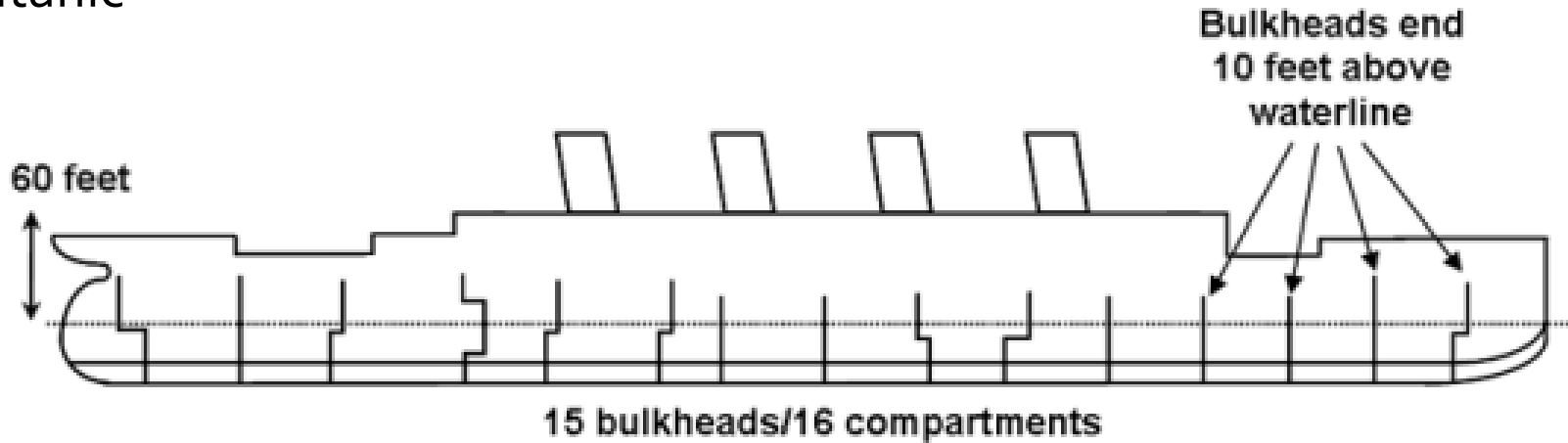


Bytte av ballastvann må beregnes nøyaktig og rekkefølge i valg av tankstørrelse er viktig å tenke på grunnet fri væske overflateeffekt. (Se igjen notater for fylling/lensing av bunntank)

Dårlig utført ballastbytte ledde til at the Cougar Ace neste forliste i 2006, angle of loll blev nesten større en kantringsvinkel. Lastfordelingen tverrskips mens ballast ble skiftet var helt symmetrisk, dvs krenkning berodde bare på negativ GM, dvs loll vinkel.

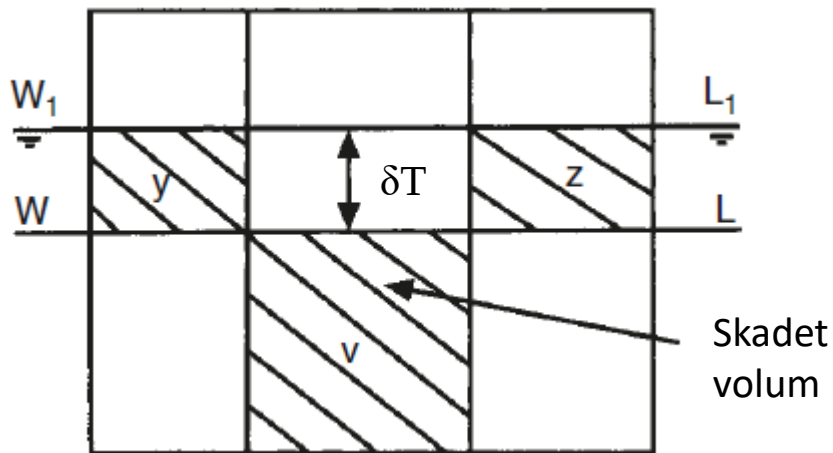
Vannfylling – Vanntette skott (bulkheads)

Titanic



Lost buoyancy metoden ved vannfylling

Denne metoden trenger ikke kunnskap om ny middeldypgang etter vannfylling og er enkel å regne på raskt for hånd. Alternativet er å regne på samme vis som att vekt blir tilført legemet med tyngdepunktsatsen, men då må man iterere seg frem til vad dypgang etter vannfylling blir. Metoden bygger på at man ser på en vannfylt situasjon hvor man har tapt oppdrift i volumet som er vannfylt mens tyngdepunktet G ligger i ro. Moderne programvare brukes for å regne på vanskelige situasjoner.



$$v = y + z$$

$$v = \delta T (A_w - A_b) = \delta T A_i$$

A_b : vannlinjearealet ovenfor vannfylt volum

A_w : totalt vannlinjeareal

A_i : intakt vannlinjeareal

Skadet volum opp til original vannlinje er lik uskadet volum ovenfor original vannlinje til ny vannlinje

$$\delta T = \frac{v}{(A_w - A_b)} = \frac{\text{Volum av tapt oppdrift}}{\text{Areal av intakt vannlinjeplan}}$$

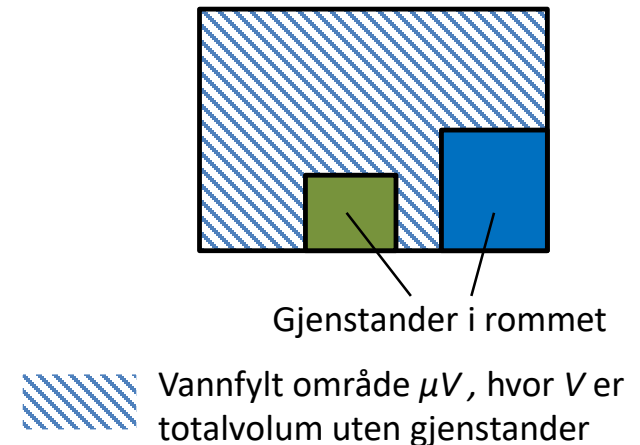
Ref: Intro Nav Arch. p. 145 , Ship StabMastersMates p.213

Lost Boyancy metoden ved vannfylling

Fremgangsmåte beregninger:

1. Sjekk permeabilitet μ og eventuelt reduser volum av tapt oppdrift.
2. Beregne x_{Fi} , y_{Fi} av intakt areal $A_i=(A_w-A_b)$
3. Beregne ny I_{xi} og I_{yi} av intakt areal rundt de nye x_{Fi} , y_{Fi}
4. Beregne oppdriftsenter av intakt volum, x_{Bi} , y_{Bi} , z_{Bi}
5. Beregne $G_{Mi}=K_{Bi}+B_{Mi}-K_G$ (K_G er lik, skipets G har ikke flyttet i denne metoden, ∇ er lik siden volum som fjernes blir erstattet med volum i VL, $v=y+z$)
6. Beregne krenge og trimvinkel ved usymmetrisk vannfylling ved hjelp av likevektssituasjon mellom rettende og kregede moment. Kregende moment beregnes rundt en vertikal akse gjennom flotasjonssenter til senter på vannfylt volum. G_{Mi} brukes for rettende moment ΔGZ .
7. Beregne minste fribord med vanlige formler

Grunnet innredning i et rom vannfylles bare en viss andel. **Permeabilitet**, μ , viser i andel hvor mye av rommet som kan fylles med vann. Typiske verdier for ulike typer rom er 0.6-0.97, gitt i *Basic Ship Theory* s. 149



Ref: *Basic Ship Theory* p 149

Grunnstøting – RENA, October 2011



Menneskelige faktorer,
Stresset tidskjema, tok
snarvei, logget feil på kart
grunnet hierarki på
bryggen og i etterhand
forfalskning av ruteplan.
Naturkatastrofe med
svære oljeutslipp som
følgje



New Zealand coast 'Bay of Plenty'
Grounding on 'Astrolabe reef'

Bedre konstruksjonsregler gjelder for nybygg

IMO – SOLAS Convention (Safety of life at sea) 2009

Oljetanker skal ikke være i direkte kontakt med skrog.

Bedre materialer sånn at skrog ikke går sønder.

Dobbel bunn, ekstra vanntett skott i bunn.

Ekstra rominndelinger i passasjerferger på bildekk – Stockholm agreement Solas 95, lokal bestemmelse Europa, ble ikke internasjonal (etter Estonia ulykken, ikke grunnstøting men et ekstra eksempel for bruk av Solas)

Vi ingeniører kan regne på hva som skjer etter en grunnstøting å prøve å designe skipet sånn at det klarer dette på beste måte, men i grunnen gjelder det at i største grad mulig skydde skip og passasjerer også mot **menneskelige faktorer på broen**.

Det hjelper med avanserte kollisjons-varningssystemer mellom fartøy, dette er helt vanlig innen flyverden men fortsatt på begynner fase innen skipsindustrien.

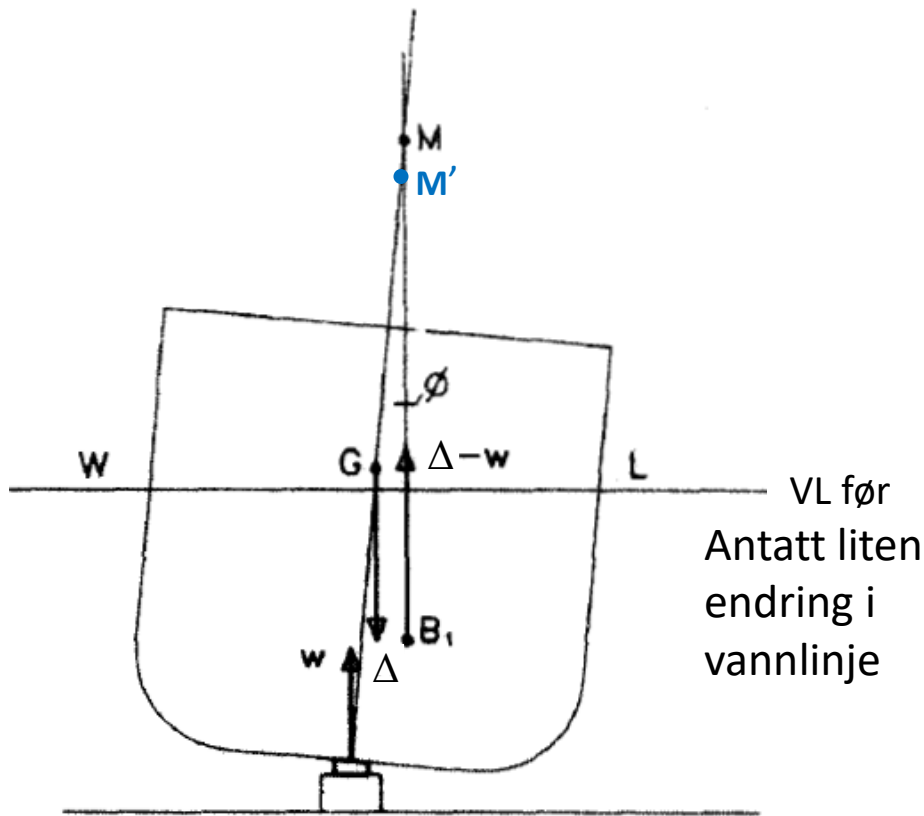
Avsiktlig grunnstøtning (eng: beaching)

I hovedsak for å redde et skip som havnet i trøbbel:



Hoegh Osaka, (Hoegh Autoliner) Ro-Ro ship, grounds deliberately 1h after departure from Southampton on the 3rd of January 2015, without any damages. It had begun to list (heel) shortly after departure. Pilot and Master are rewarded for great skill and quick handling of the problem that could have ended in disaster further out at sea.

Grunnstøting/Dokking



$\Delta - w$: Redusert oppdrift, w i [kg, tonn]

Krengende moment: $M_k = w \overline{KM} \sin \phi$

Redusert rettende moment: $M_r = (\Delta - w) \overline{GM} \sin \phi$

Likevekt $M_k = M_r$ gir via utledning:

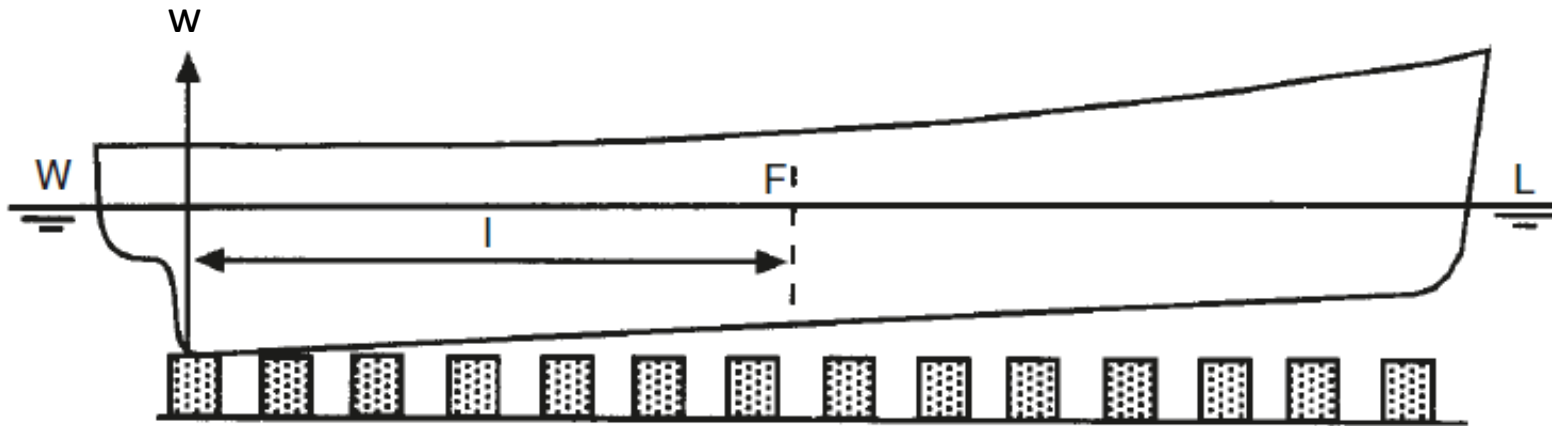
$$\overline{MM'} = w \overline{KM} / \Delta$$

$$\overline{GM'} = \overline{GM} - |\overline{MM'}|$$

Ved grunnstøting reduseres GM til såkalt effektiv GM' hvor M går ned til virtuell M' , stabilitet reduseres. Effektiv rettende arm blir $GZ = GM' \sin \phi$.

Ref: Intro NavalArchitecture p 55-56, Stability for Masters and Mates Ch. 35

Last w ved dokking



$$wl = tMCT \quad w = \frac{tMCT}{l} \quad \text{MCT i [tonn m/m hvis } w \text{ er i tonn og } t, l \text{ er i m]}$$

wl : Moment tilført skip ved dokking rundt F

$tMCT$: Tapt moment ved dokking antatt at skipet flyter ved t før dokking og ved $t=0$ ved dokking.

Øvrige temaer

Langskips belastning, hogging, sagging. Skalering
modellskala-fullskala...

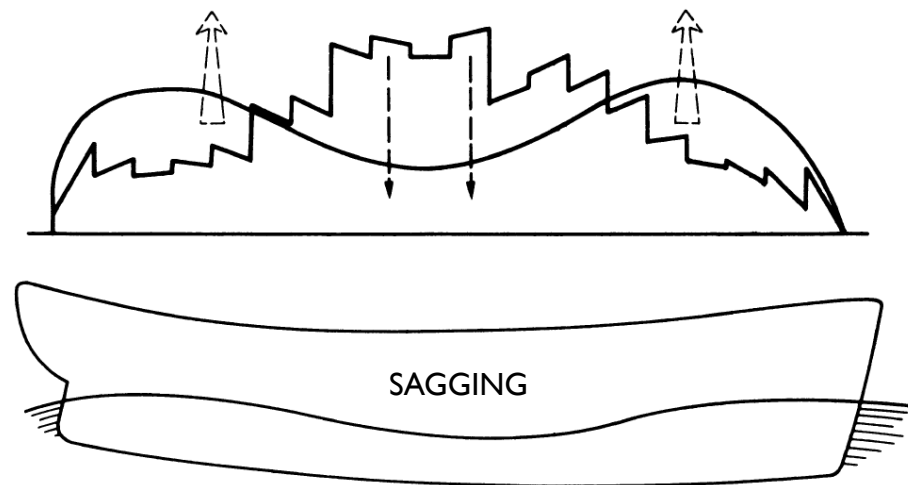
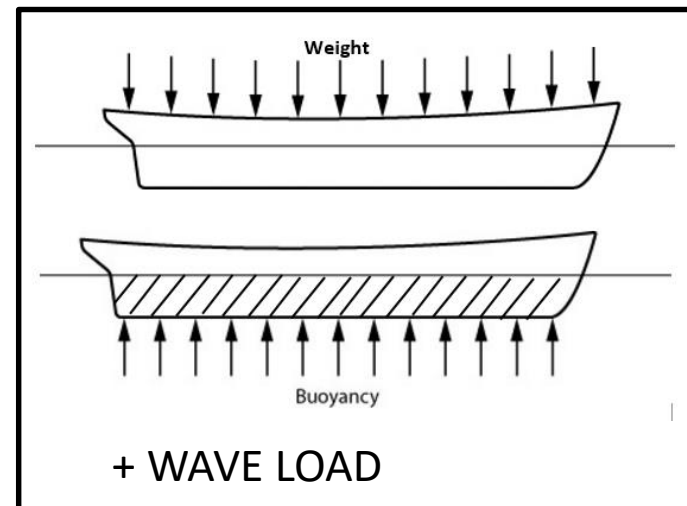
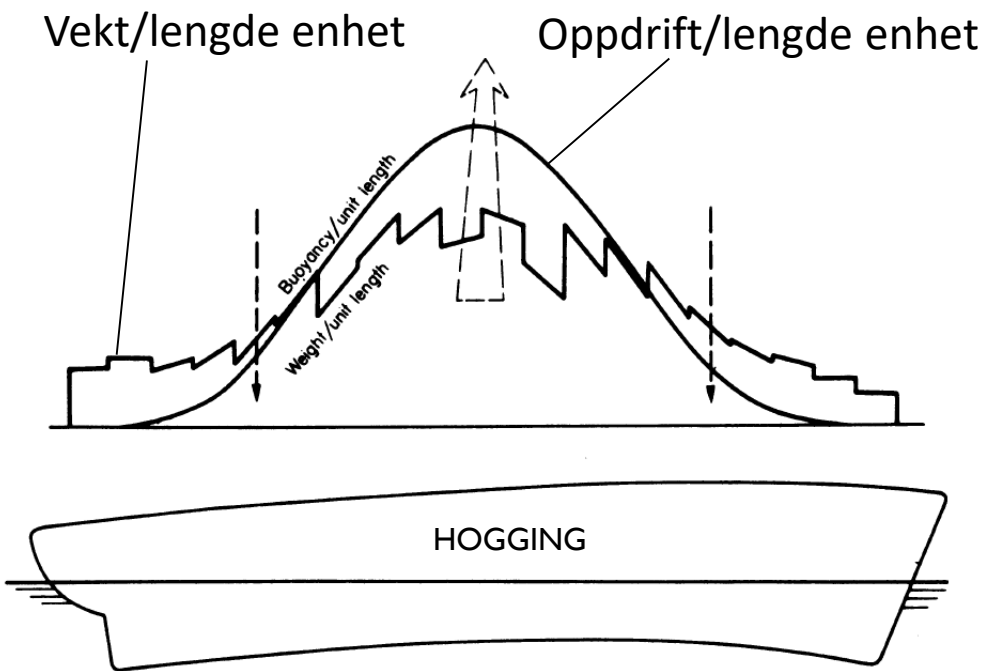
[Til innholdsfortegnelse](#)



Langskips belastning

Skipets neddykkede volum påvirkes av langskips belastning, dette gir effekt på GZ-kurvens utforming. Typisk bedre stabilitet i «Sagging» tilstand.

Stille vann last + Dynamisk bølgelast må beregnes.



Ref: Intro NavalArchitecture p. 177-179, Introduction to Naval Architecture p. 128-130

Skalering mellom modellskala og fullskala

Vet man hvordan skalere enhetene [m], [s], [kg] så kan man utlede alle skaleringer.

Skalafaktor fra modell til fullskala beregnes : $L_f/L_m = \lambda$ (f.eks. $\lambda=25$)

Parameter eksempel	Enhet	Skalering	Eksempel modellskala (m) til fullskala (f)
Lengde (GM, Dypgang, etc)	[m]	λ	$L_f = L_m \lambda$ (GM _f = GM _m λ $T_f = T_m \lambda$)
Massedeplassment	[kg]	λ^3	$\Delta_f = \Delta_m \lambda^3$
Volumdeplasement	[m ³]	λ^3	$\nabla_f = \nabla_m \lambda^3$
Arealtrehetsmom.	[m ⁴]	λ^4	$I_{x,f} = I_{x,m} \lambda^4$
Rulleperiode	[s]	$\sqrt{\lambda}$	$T_{r,f} = T_{r,m} \sqrt{\lambda}$
Hastighet	[m/s]	$\lambda / \sqrt{\lambda} = \sqrt{\lambda}$	$u_f = u_m \sqrt{\lambda}$
Kraft	[N=kg m/s ²]	$\lambda^3 \lambda / (\sqrt{\lambda} \sqrt{\lambda}) = \lambda^3$	$g \Delta_f = g \Delta_m \lambda^3$
Trehetsmoment	[kg m ²]	$\lambda^3 \lambda^2 = \lambda^5$	$I_{xx,f} = I_{xx,m} \lambda^5$
Trehetsradie	[m]	$\sqrt{\lambda^3 \lambda^2 / \lambda^3} = \lambda$	$R_{xx,f} = \sqrt{I_{xx,m} / \Delta_m} = R_{xx,m} \lambda$

Ref: Kompendium WEC tank_testing, og matlabfil skalering.m i mappe ovingsoppgaver

Referanser

Referanser til følgende bøker på FTP er gitt i presentasjonen med sidehenvisning.

- [1] K. J. Rawson and E. C. Tupper. Basic Ship Theory. Elsevier Butterworth-Heinemann, Jordan Hill, Oxford and Woburn, MA, 5th edition, Volume 1, 2001.
- [2] E. Tupper. Introduction To Naval Architecture, Elsevier Butterworth-Heinemann, Jordan Hill, Oxford, 3rd edition, 1996.
- [3] B. Barrass and D. R. Derrett. Ship Stability for Masters and Mates, Elsevier Butterworth-Heinemann, Jordan Hill, Oxford, 6th edition, 2006.
- [4] A. B. Biran. Ship Hydrostatics and Stability, Elsevier Butterworth-Heinemann, Jordan Hill, Oxford, 1st edition, 2003.
- [5] DNV GL AS, DNVGL-RU-SHIP, Part 3 Hull Ch15 Stability, edition October 2015.

[Til innholdsfortegnelse](#)