



# Høgskulen på Vestlandet

## Bacheloroppgave

NAB3030

### Predefinert informasjon

<b>Startdato:</b>	12-04-2019 09:00	<b>Termin:</b>	2019 VÅR
<b>Sluttdato:</b>	03-05-2019 14:00	<b>Vurderingsform:</b>	Norsk 6-trinns skala (A-F + Bestått)
<b>Eksamensform:</b>	Prosjektoppgave		
<b>SIS-kode:</b>	203 NAB3030 1 PRO-1 2019 VÅR Haugesund		
<b>Intern sensor:</b>	(Anonymisert)		

### Deltaker

**Kandidatnr.:** 116

### Informasjon fra deltaker

<b>Tittel *:</b>	Bruk av Weiss' formel med slakke tanker		
<b>Engelsk tittel *:</b>	Application of Weiss' Formula with Slack Tanks		
<b>Navn på veileder *:</b>	Surre Olav Fagerland		
<b>Kan den anonymiserte besvarelsen brukes til undervisning?:</b>	Ja	<b>Egenerklæring *:</b>	Ja
<b>Jeg bekrefter at jeg har registrert oppgavetittelen på norsk og engelsk i StudentWeb og vet at denne vil stå på vitnemålet mitt *:</b>	Ja	<b>Inneholder besvarelsen konfidensiell materiale?:</b>	Nei

### Gruppe

**Gruppenavn:** (Anonymisert)  
**Gruppenummer:** 8  
**Andre medlemmer i gruppen:** 129, 113, 112

Jeg godkjenner avtalen om publisering av bacheloroppgaven min \*

Ja



Høgskulen  
på Vestlandet

# BACHELOROPPGAVE

Bruk av Weiss' formel med slakke tanker

Application of Weiss' Formula with Slack Tanks

**Edvardsen, Gisle Håland**

**Johansen, Camilla**

**Litlehamar, Harald Frette**

**Nizigiyimana, Divin**

Nautikk

Høgskulen på Vestlandet

Veileder Sverre Olav Fagerland

03.05.2019

Jeg bekrefter at arbeidet er selvstendig utarbeidet, og at referanser/kildehenvisninger til alle kilder som er brukt i arbeidet er oppgitt, jf. Forskrift om studium og eksamen ved Høgskulen på Vestlandet, § 10.

# Forord

Denne bacheloroppgaven er utarbeidet som et avsluttende hovedprosjekt ved Høgskulen på Vestlandet, campus Haugesund. Nautikkutdanningen har gitt oss grunnleggende innsikt i stabilitetsfaget, og vi ønsket gjennom denne oppgaven å tilegne oss ytterligere kunnskap innenfor dette feltet. Gjennom oppgaven har vi eksperimentelt undersøkt forholdet mellom rulleperiode og metasenterhøyde for fartøyer med slakke tanker. Arbeidet har vært meget interessant i alle faser, men også svært tidkrevende.

Gjennom arbeidet med bacheloroppgaven har vi fått uvurderlig hjelp fra flere hold. Vi ønsker aller først å rette en stor takk til veilederen vår Sverre Olav Fagerland. I forkant av oppgaven lovet han å være streng og tverr, men dette løftet har han definitivt brutt. Møtene med Sverre har derimot vært svært hyggelige, og vi har underveis fått gode og konstruktive råd. Dette har utvilsomt løftet oppgavens kvalitet.

Videre ønsker vi å takke Robert Lossius Alsaker ved Karmsund Videregående Skole. Han lot oss låne utstyr og lokaler til konstruksjon av forsøksoppsettet, og bidro sterkt til å ivareta vår helse og sikkerhet under arbeidet.

Helen Sæverud, ansvarlig for maskinlaboratoriet ved høyskolen, har også gjort seg fortjent til en takksigelse. Hun stilte lokaler til disposisjon for gjennomføring av alle eksperimenter.

Avslutningsvis ønsker vi å takke alle som her er glemt, men som likevel føler de har gjort seg fortjent til en takk.

Haugesund, 03.05.2019

# Sammendrag

I denne bacheloroppgaven har den naturlige rulleperioden for fartøyer med slakke tanker blitt undersøkt. Oppgaven tar utgangspunkt i problemstillingen:

*Kan Weiss' formel benyttes for å estimere et fartøys rulleperiode, selv ved slakke tanker, dersom en setter inn en verdi for metasenterhøyden som er korrigert for fri væske-effekt?*

For å finne svar på dette, har problemstillingen først blitt uttrykt som en matematisk modell. Denne har så blitt testet eksperimentelt med et egenkonstruert forsøksoppsett. Oppsettet bestod av en vanntank og en «box-shaped» fartøysmodell opplagret i en jigg. Jiggen begrenset fartøysmodellens frihetsgrader til hiv og rulling. Det ble gjennomført totalt 102 rulleforsøker deplasement og KG ble holdt konstant, men med varierende fyllingsgrad, lastekondisjon og tankkonfigurasjon. Rulleresponsen ble målt ved hjelp av et akselerometer og overført til Matlab for databehandling og analyse.

Resultatene har antydning at svaret på oppgavens problemstilling er tvetydig. I forsøkene der fartøysmodellen var konfigurert med to lastetanker hadde den frie væske-effekten liten grad av dominans sammenlignet med fartøysmodellens gjenopprettende moment. I disse tilfellene var også forholdet mellom den frie væskes egenperiode og fartøysmodellens egenperiode 0.5. Resultatene har i denne situasjonen antydning at bruk av Weiss' formel ville gi et godt estimat for de målte rulleperiodene.

I tilfellene der fartøysmodellen var konfigurert med én lastetank ble det observert stor spredning i de målte rulleperioder. Her hadde den frie væske-effekten større grad av dominans, og forholdet mellom egenperioder lå i resonansområdet. I disse forsøkene gav bruk av Weiss' formel dårlig samsvar med de målte rulleperioder.

Videre forskning vil være påkrevd for å få en fullstendig forståelse for gyldighetsområdet for Weiss' formel for fartøyer med slakke tanker.

# Abstract

In this bachelor thesis the natural roll period of vessels with slack tanks has been investigated. The research question was formulated as follows:

*Can Weiss' formula be applied in order to estimate a vessel's roll period, even with slack tanks, if the metacentric height is corrected for free surface effects?*

In order to arrive at an answer, the research question was formulated as a mathematical model. This model was then tested experimentally using a setup constructed and designed by the authors. The experimental setup consisted of a water tank and a box-shaped vessel model mounted in a jig. The jig's purpose was to limit the vessel model's degrees of freedom to heave and roll. A total of 102 roll experiments were conducted with several different filling ratios, loading conditions and tank configurations, but with constant VCG and displacement. The vessel's roll response was logged using an accelerometer, and the data transferred to Matlab for processing and analysis.

With respect to the research question, the experimental results were ambiguous. In the experiments where the vessel model was configured with two tanks, the free surface effect was small compared to the vessel's restoring moment. The ratio between the eigenperiods of the slack tanks and the vessel model was 0.5. The results for the two-tank configuration implied that application of Weiss' formula would yield good estimates for the measured roll periods.

For the one-tank configuration, a large spread in the measured roll periods was observed. With this tank configuration, the free surface effect had a greater dominance and the ratio of the eigenperiods was in the area of resonance. The results with this tank configuration implied that application of Weiss' formula would yield poor estimates for the measured roll periods.

Further research is required to fully understand the range of validity for Weiss' formula for vessels with slack tanks.

# Ordforklaring

B	Skipets oppdriftssenter.
D	Skipets dypgang.
f	Weiss' faktor.
G	Skipets tyngdepunkt.
GM	Metasenterhøyde.
GZ	Gjenopprettende arm.
IMO	International Maritime Organization.
K	Skipets kjøllinje.
KG/VCG	Den vertikale avstanden mellom skipets kjøll og tyngdepunkt.
M	Skipets metasenter.
T	Rulleperiode.

Ytterligere symboler, ord og uttrykk er forklart i oppgavens hoveddel.

# Innholdsfortegnelse

<b>FORORD</b> .....	<b>II</b>
<b>SAMMENDRAG</b> .....	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>IV</b>
<b>ORDFORKLARING</b> .....	<b>V</b>
<b>FIGURLISTE</b> .....	<b>VII</b>
<b>1 INNLEDNING</b> .....	<b>1</b>
<b>2 TEORI</b> .....	<b>3</b>
2.1 LITTERATUR.....	3
2.2 UTVIKLING AV MATEMATISK MODELL .....	6
<b>3 METODE</b> .....	<b>12</b>
3.1 OVERORDNET OM OPPGAVENS METODE .....	12
3.2 FORSØKSOPPSETTET.....	12
3.3 FORSØKSUTFØRELSE.....	15
3.4 DATAINNHEMTING .....	16
3.5 ANALYSE AV DATA .....	16
3.6 HÅNDTERING AV USIKKERHET .....	17
<b>4 RESULTAT</b> .....	<b>19</b>
4.1 UTEN LANGSKIPSINNDELING.....	19
4.2 MED LANGSKIPSINNDELING .....	23
<b>5 DISKUSJON</b> .....	<b>28</b>
5.1 OVERORDNET VURDERING AV DATA .....	28
5.2 VURDERING AV DATA OPP MOT PROBLEMSTILLINGEN.....	31
5.3 EN FORKLARINGSMODELL.....	32
<b>6 KONKLUSJON</b> .....	<b>37</b>
<b>REFERANSER</b> .....	<b>39</b>
<b>VEDLEGG</b> .....	<b>40</b>
VEDLEGG 1: FORSØKSPROGRAM.....	40
VEDLEGG 2: STABILITETSDATA FOR DE ULIKE LASTEKONDISJONER .....	43
VEDLEGG 3: REGRESJONSKOEFFISIENTER OG KALKULERTE VERDIER .....	44
VEDLEGG 4: EKSEMPEL PÅ FORSØKSLOGG.....	45



# Figurliste

Figur 1: IMO's forslag til Weiss' faktor for kystfraktere og fiskefartøyer (IMO, 1993). .....	6
Figur 2: Fartøysmodellens dimensjoner. ....	13
Figur 3: Forsøksoppsettet .....	14
Figur 4: Uten langskipsinndeling, lastekondisjon 1. ....	19
Figur 5: Uten langskipsinndeling, lastekondisjon 2. ....	20
Figur 6: Uten langskipsinndeling, lastekondisjon 3. ....	21
Figur 7: Uten langskipsinndeling, lastekondisjon 4. ....	22
Figur 8: Med langskipsinndeling, lastekondisjon 1.....	23
Figur 9: Med langskipsinndeling, lastekondisjon 2.....	24
Figur 10: Med langskipsinndeling, lastekondisjon 3.....	25
Figur 11: Med langskipsinndeling, lastekondisjon 4.....	26
Figur 12: Uten fri væske, ad hoc.....	27
Figur 13: Idealisert fri harmonisk oscillasjon med demping .....	29
Figur 14: Sammenligning av eksperimentelle data med regresjonskurve .....	30
Figur 15: Weiss' faktor uten langskipsinndeling .....	31
Figur 16: Weiss' faktor med langskipsinndeling .....	32
Figur 17: Faseforskyvning (Boyce & DiPrima, 2012) .....	33
Figur 18: Forhold mellom den tvungne oscillasjonens amplitude og drivkraftens amplitude ved likevekt. (Boyce & DiPrima, 2012) .....	34

# 1 Innledning

Den tyske diplomingeniøren G. Weiss arbeidet under andre verdenskrig med å utruste handelsfartøyer til hjelpekrigsskip. Hjelpekrigsskipenes stabilitet var meget viktig, og han utarbeidet derfor en metodikk for å bestemme fartøyets metasenterhøyde ved hjelp av rulletesting. Denne metodikken gikk ut på å måle fartøyets naturlige rulleperiode, og ved bruk av en formel regnet han seg deretter frem til fartøyets metasenterhøyde. I 1953 samlet han sine erfaringer fra krigsårene i en vitenskapelig artikkel (Weiss, 1953). Formelen som ble benyttet har senere fått navnet Weiss' formel, og metodikken er i dag blant annet implementert i IMOs International Code on Intact Stability (IMO, 1993). IMO tillater her fartøyer under 70 meters lengde å benytte rulletesting for å estimere en omtrentlig metasenterhøyde. Det anbefales av IMO å redusere antall slakke tanker til et minimum under slik rulletesting.

Et fartøy har imidlertid ofte slakke drivstoff-, laste- eller ballasttanker. En metodikk som også er gyldig i slike situasjoner kan derfor være hensiktsmessig. Med utgangspunkt i IMOs tilnærming har det i denne bacheloroppgaven derfor blitt undersøkt om det er mulig å utvide gyldighetsområdet for Weiss' formel til også å gjelde ved slakke tanker. Oppgavens problemstilling ble formulert på følgende måte:

*Kan Weiss' formel benyttes for å estimere et fartøys rulleperiode, selv ved slakke tanker, dersom en setter inn en verdi for metasenterhøyden som er korrigert for fri væske-effekt?*

Det ble utviklet en matematisk modell som et utgangspunkt for å besvare dette. Samsvaret med den matematiske modellen ble så testet eksperimentelt ved bruk av et egenkonstruert forsøksoppsett. Det eksperimentelle oppsettet bestod av en fartøysmodell med rektangulært tverrsnitt som fløt i en vanntank, og en jigg som begrenset fartøysmodellens frihetsgrader til hiv og rulling. Med dette oppsettet ble det gjennomført totalt 102 rulleforsøk. For å få en forståelse for fartøysmodellens respons under et spekter av forhold, ble lastekondisjon, fyllingsgrad og tankkonfigurasjon variert, mens KG og deplasement ble holdt uendret. Fartøysmodellens rullerespons ble for hvert rulleforsøk logget med en mobiltelefon med innebygget akselerometer. De loggede data ble overført til Matlab for bearbeiding og analyse.

Det har også blitt gjort en litteraturstudie. Dette har i all hovedsak fulgt to uavhengige spor. Litteraturstudiet viser at det tidligere har vært gjort omfattende forskning på rulling, og parallelt er det også forsket mye på fri væske-effekt, og såkalt sloshing. Denne oppgaven plasseres fagmessig i grensesjiktet mellom disse to feltene. Litteraturstudiet indikerer at vekselvirkningen mellom rulling og fri væske uten en ytre harmonisk drivkraft, tidligere har vært lite belyst. I den grad det har vært belyst, har dette ofte vært i tilknytning til passive anti-rullesystemer.

Oppgaven er i all hovedsak disponert etter det klassiske IMROD-oppsettet (Rognsaa, 2015). Umiddelbart etter denne innledningen følger et teorikapittel. Her presenteres litteraturstudiet og den matematiske modellen utvikles. Det påfølgende kapittelet omhandler oppgavens metode, og er inndelt i seks underkapitler. I første underkapittel beskrives oppgavens metode på generelt grunnlag. Videre underkapitler går blant annet i detalj omkring forsøksoppsettets utforming, eksperimentenes utførelse og analyse av de innhentede data. I det fjerde kapittelet presenteres de eksperimentelle resultatene, før disse blir analysert og diskutert i femte kapittel. Oppgavens konklusjon følger i kapittel seks.

## 2 Teori

Dette kapittelet er inndelt i to underkapitler. I første underkapittel presenteres kort det gjennomførte litteraturstudiet, mens det i det andre underkapittelet blir utledet en matematisk modell.

### 2.1 Litteratur

For å få en forståelse for tidligere arbeid innenfor feltet, har det blitt gjort en litteraturstudie der det ble sett nærmere på hva som påvirker et fartøys rullebevegelse, samt effekten av fri væskeoverflate. Dette studiet blir presentert under.

Når det gjelder rulling kan den britiske ingeniøren William Froude anses som en pioner. Han undersøkte fenomenet rulling allerede på midten av 1800-tallet (Froude, 1861). Froude blir også sett på som den første som anvendte modelltankforsøk i forbindelse med utvikling av skipsskrog. Siden hans tid har det blitt gjort mye teoretisk arbeid og eksperimentelle forsøk rundt prediksjon av rullebevegelse (Himeno, 1981).

Den tyske diplomingeniøren G. Weiss utarbeidet under andre verdenskrig en metodikk for å forutsi et fartøys metasenterhøyde basert på dets naturlige rulleperiode (Weiss, 1953). Dette gav gode resultater, og gjennom hele krigsforløpet var ingen av de testede fartøyene involvert i ulykker knyttet til mangelfull stabilitet. Ved krigens slutt satt en på store mengder undersøkelsesmateriale forbundet med disse rulleforsøkene, men dette er dessverre gått tapt. Weiss' metodikk benyttet følgende formel:

$$T = \frac{f * B}{\sqrt{GM}}$$

Her er  $B$  fartøyets bredde i vannlinjen. Ellers er notasjonen som beskrevet i ordforklaringen. Dette uttrykket har senere fått navnet Weiss' formel, og metodikken er blant annet implementert av IMO for fartøyer under 70 meter (IMO, 1993).

Weiss fant at  $f$  varierer mellom 0.71 og 0.83. Fartøyets utforming og lastekondisjon vil føre til endring i denne faktoren, og forholdet mellom fartøyets dypgang og bredde ble her identifisert som vesentlig. Samtidig viste det seg at avrundede spant førte til høyere Weiss' faktor og rulleperiode enn hva som var tilfellet for rettere spant.

I senere tid beskrives rulling som den bevegelsen som er dårligst forstått og mest kompleks blant alle fartøyets frihetsgrader (Falzarano, Somayajula, & Seah, 2015). Dette har i all hovedsak sammenheng med mangelfull metodikk for estimering av fartøyets rulledemping. De andre frihetsgradene kan modelleres med gode resultater ved bruk av den såkalte «strip-metoden» utviklet på 70-tallet. Denne metoden er basert på potensiell strømnings-teori (Kawahara, Maekawa, & Ikeda, 2012). Rulledempingen er derimot vanskelig å predikere med strip-metoden på grunn av betydelige viskøse effekter.

Ikeda utviklet en semi-empirisk metode for å kunne predikere rulledempingen. Denne metoden gav en nøyaktighet på nivå med de andre frihetsgradene (Kawahara, Maekawa, & Ikeda, 2012). Ikedas metode ble utledet basert på en kombinasjon av teori og systematisk modelltesting (Søder, Rosén, & Huss, 2019). Metoden er basert på de samme konseptene som strip-metoden, og behandler rulledempingen som summen av fem uavhengige komponenter: friksjon, bølgedannelse, spiraldannelse, skrogløft og kjøldemping. Komponenten skrogløft er utelukkende relevant dersom fartøyet gjør fart gjennom vannet. Opp gjennom årene har metoden blitt forbedret, og metoden brukes i dag i stort omfang. Andre metoder har også blitt utviklet, blant annet ved bruk av regresjonsanalyse. Disse metodene gir varierende resultater (Kawahara, Y., 2008).

Den andre delen av litteraturstudiet omhandler fri væske-effekt. Denne effekten blir regelmessig kalkulert om bord, i tilknytning til fartøyets ordinære stabilitetsberegninger. I disse beregningene blir utelukkende den statiske forflytningen av den frie væskes tyngdepunkt vurdert. Dette resulterer i en virtuell reduksjon i fartøyets metasenterhøyde og gjenopprettende arm.

I sammenheng med rullebevegelse inntar den frie væske-effekten imidlertid en betydelig mer kompleks form. Fenomenet kalles på generell basis «sloshing», og kan beskrives som bevegelser av væske frem og tilbake i en delvis fylt tank. Effekten av sloshing er en funksjon av væskedybde og -tetthet, rullekarakteristikk og tankdimensjoner. Ved store rulleamplituder kan væsken respondere med ulineære effekter som turbulens, hydrauliske hopp, bølgebryting og tredimensjonale effekter (Eswaran & Saha, 2011).

Faltinsen oppgir to grunner for voldsom sloshing (Faltinsen, 1990):

1. den frie væskes egenperiode er lokalisert i et tidsdomene hvor det er betydelig fartøysbevegelse.
2. den frie væske bevegelser møter liten demping inne i en tank.

Han nevner også i forbindelse med passiv rulledemping at den dempende effekten til en passiv antirulletank øker med forholdet mellom virtuell reduksjon i metasenterhøyde og total metasenterhøyde. For typiske antirullesystemer ligger dette forholdstallet mellom 0.15 og 0.3.

Den totale effekten av sloshing kan bestemmes ved å estimere den hydrodynamiske trykkdistribusjonen, kreftene, momentene og de naturlige frekvensene til væsken i de delvis fylte tankene. Dette er et vanskelig problem å løse analytisk, da grensebetingelsene og den frie væskeoverflatens posisjon er ikke-lineær og varierer med tiden (Ikeda, Ibrahim, & Pilipchuck, 2001). Analytiske og numeriske løsninger innenfor dette området har ikke blitt undersøkt videre i dette litteraturstudiet, da det faller utenfor oppgavens problemstilling.

Litteraturstudiet har videre indikert at kombinasjonen av fri væske-effekt og et fartøys naturlige rulleperiode tidligere har vært lite belyst. Weiss nevnte at fri væskeoverflate hadde innvirkning på rulleperioden, der fyllingsgraden hadde stor betydning. Egenperioden til den frie væsken førte også til en periodisk reduksjon eller økning av metasenterhøyden. (Weiss, 1953).

	<i>f</i> values
Empty ship or ship carrying ballast	$f \approx 0.88$
Ship fully loaded and with liquids in tanks comprising the following percentage of the total load on board (i.e. cargo, liquids, stores, etc.):	
20% of total load	$f \approx 0.78$
10% of total load	$f \approx 0.75$
5% of total load	$f \approx 0.73$
Double-boom shrimp fishing boats	$f \approx 0.95$
Deep sea fishing boats	$f \approx 0.80$
Boats with a live fish well	$f \approx 0.60$

Figur 1: IMOs forslag til Weiss' faktor for kystfraktere og fiskefartøyer (IMO, 1993).

IMO foreslår i forbindelse med bruk av Weiss' formel for kystfraktere og fiskefartøyer med slakke tanker, en justering av Weiss' faktor i henhold til figuren ovenfor (IMO, 1993). Det kan observeres at Weiss' faktor er økende jo større andel væskelasten utgjør av den totale lasten.

## 2.2 Utvikling av matematisk modell

Det skal her utvikles en enkel matematisk modell. Denne kan anses som en spissformulering av oppgavens problemstilling, og vil være hensiktsmessig for å tolke og analysere de eksperimentelle resultatene. Utviklingen av den matematiske modellen og enkelte av formlene har hentet inspirasjon fra litteraturen (Barras & D.R. Derrett, 2012) (Bergdahl, 2008) (Boyce & DiPrima, 2012).

Den matematiske modellen gjelder for fri dempet oscillasjon for et objekt med rektangulært tverrsnitt. Objektet inneholder væske med fri overflate. Det gjøres noen forenklinger og forutsetninger. Disse kan i hovedtrekk oppsummeres som følger:

- Modellen beskriver ren rullebevegelse. Andre frihetsgrader og rullebevegelsens kobling med disse neglisjeres.
- Summen av oppdriftskraften og objektets tyngde er alltid null.
- Den frie væsken behandles kvasistatisk. Dette betyr at det utelukkende blir tatt hensyn til den statiske forflytningen av væskens tyngdepunkt ved de ulike krengevinkler. Dynamiske effekter forårsaket av den frie væsken neglisjeres.

For rotasjonsbevegelse gjelder følgende sammenheng på generell basis:

$$\sum \tau = I_M \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

Venstre side av formelen summerer alle momenter som virker på objektet. Høyre side av formelen angir produktet av objektets treghetsmoment  $I_M$ , og den resulterende vinkelakselerasjonen. Dette er analogt med Newtons 2. lov.

Momentene som virker på objektet er:

- Objektets gjenopprettende moment,  $\tau_{Restoring}$ .
- Tillagt treghet,  $\tau_{Added\ inertia}$  (kalt added mass eller added inertia i litteraturen).
- Damping,  $\tau_{Damping}$ .
- Fritt væskemoment,  $\tau_{FS}$ .

Summen av momentene som virker på objektet kan altså uttrykkes som

$$\sum \tau = \tau_{Restoring} + \tau_{Added\ inertia} + \tau_{Damping} + \tau_{FS}$$

De tre første momentene behandles videre på konvensjonell måte slik det blir gjort i litteraturen, dog noe forenklet. Det siste leddet som beskriver momentet som følge av den frie væsken, behandles her kvasistatisk og dynamiske effekter neglisjeres. Dette avviker fra den konvensjonelle litteraturen, men om oppgavens problemstilling skal være riktig,



må en selv ved å neglisjere dynamikken i de slakke tankene, kunne komme fram til en god approksimasjon for et fartøys naturlige rulleperiode.

Det første momentet nevnt over er objektets gjenopprettende moment. Denne størrelsen er gitt ved:

$$\tau_{Restoring} = -\Delta_W * GZ = -\Delta GM \sin\theta$$

Symbolet  $\Delta_W$  angir her objektets vektdeplasement (i newton ved bruk av SI-enheter),  $GZ$  den horisontale avstanden mellom tyngdekraftens og oppdriftskraftens vektorer, og  $GM$  den vertikale avstanden mellom objektets massesenter og objektets metasenter målt i objektets referansesystem (med en vinkel  $\theta$  på et jordfast referansesystem).  $GM$  for et objekt med rektangulært tverrsnitt er videre gitt ved:

$$GM = \frac{B^2}{12D} \left( 1 + \frac{\tan^2\theta}{2} \right) + \frac{D}{2} - KG$$

Her er  $B$  objektets bredde,  $D$  objektets dypgang og  $KG$  den vertikale avstanden mellom objektets kjøll og tyngdepunkt målt i objektets referansesystem.

Uttrykket er gyldig for krengevinkler slik at

$$|\tan\theta| \leq \frac{2(d-D)}{B} \text{ og } |\tan\theta| \leq \frac{2D}{B}, \quad \text{der } d \text{ indikerer objektets dybde.}$$

Kombinert gir dette følgende uttrykk for det gjenopprettende moment:

$$\tau_{Restoring} = -\Delta \left[ \frac{B^2}{12D} \left( 1 + \frac{\tan^2\theta}{2} \right) + \frac{D}{2} - KG \right] \sin\theta$$

Det andre momentet nevnt over er tillagt treghet. Tillagt treghet er et resultat av at

objektets rullebevegelse drar med seg og akselererer vannet i objektets umiddelbare nærhet. Denne størrelsen gis ofte symbolet  $A_{44}$ , og momentet som følge av denne størrelsen er proporsjonal med vinkelakselerasjonen, slik at

$$\tau_{Added\ inertia} = A_{44} \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

I utgangspunktet er tillagt treghet også en funksjon av objektets rulleperiode, men i den videre utledningen vil tillagt treghet betraktes som konstant for et objekt innenfor et intervall av rulleperioder. Konstanten kan bestemmes eksperimentelt.

Det tredje momentet nevnt over, er demping. Demping kan videre dekomponeres i minst tre underkomponenter: hydrodynamisk demping, skrogfriksjon og spiraldannelse. Når objektet ruller dannes et tilnærmet konsentrisk bølgemønster i vannoverflaten. Dette trekker energi fra rullebevegelsen, og kalles hydrodynamisk demping. Skrogfriksjon er friksjonen mellom skroget og vannet. Friksjon er i utgangspunktet en funksjon av kvadratet av hastigheten. Den tredje komponenten, spiraldannelse, oppstår når vannets strømlinjer på grunn av sin bevegelsesmengde, ikke er i stand til å følge skrogets kurve. Dette resulterer i en turbulent tilbakestrømming av vann og negativ hastighetsprofil nær skroget. Summen av disse komponentene kalles altså demping, og gis ofte symbolet  $B_{44}$ . Dreiemomentet som følge av denne størrelsen anses her som proporsjonalt med vinkelhastigheten, slik at

$$\tau_{Damping} = B_{44} \frac{d\theta}{dt}$$

Den kvasistatiske forflytningen av væskelastens tyngdepunkt resulterer i et moment som er gitt ved

$$\tau_{FS} = \sum I_{AY} \left( 1 + \frac{\tan^2\theta}{2} \right) \sin\theta$$

Det summeres her over produktet av den individuelle tanks annet arealmoment  $I_A$  og væskelastens spesifikke vekt  $\Upsilon$  (i newton per kubikkmeter i SI-systemet). Notasjonen er

ellers som over. Uttrykket er gyldig for krengevinkler slik at

$|\tan\theta| \leq \frac{2u}{b}$  og  $|\tan\theta| \leq \frac{2s}{b}$ , der u, b og s er den individuelle tankens ullage, bredde og sounding.

Oppsummert gir dette

$$\tau_{Restoring} + \tau_{Added\ inertia} + \tau_{Damping} + \tau_{FS} = I_M \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

Innsatt uttrykkene for de ulike momentene, og organisert i ordnet rekkefølge, gir dette følgende differensialligning:

$$(I_M + A_{44}) \frac{d^2\theta}{dt^2} + B_{44} \frac{d\theta}{dt} + \Delta_W \left[ \left( \frac{B^2}{12D} - \frac{\sum I_{AY}}{\Delta_W} \right) \left( 1 + \frac{\tan^2\theta}{2} \right) + \frac{D}{2} - KG \right] \sin\theta = 0$$

For å gjøre ligningen mulig å løse på en god måte er linearisering påkrevd. For små vinkler kan sinus settes lik vinkelen, og kvadratet av tangens kan settes lik null. For en krengevinkel på 12° gir dette, avhengig av dypgang og massesenter, en feil i uttrykkets siste ledd på ca 4%. Linearisert blir ligningen redusert til:

$$(I_M + A_{44}) \frac{d^2\theta}{dt^2} + B_{44} \frac{d\theta}{dt} + \Delta_W GM_V \theta = 0$$

Hvor  $GM_V$  er den virtuelt reduserte metasenterhøyden som følge av fri væske, og er som i standard stabilitetsberegninger gitt ved differansen mellom KM, og KG justert for fri væske.

Altså

$$GM_V = KM - KG_V = \left( \frac{B^2}{12D} + \frac{D}{2} \right) - \left( KG + \frac{\sum I_{AY}}{\Delta_W} \right)$$

Uttrykket er gyldig for små krengevinkler.

Differensialligningen ovenfor er en andre ordens lineær, homogen differensialligning, med konstante koeffisienter. I tilfeller der verdien for demping er lavere enn kritisk demping, er differensialligningens røtter komplekse og den generelle løsningen er

$$\theta(t) = Ae^{-B_{44}t/2(I_M+A_{44})} \cos\left(\frac{2\pi}{T}t - \delta\right)$$

Her er A amplituden ved tid 0,  $\delta$  fasen og T rulleperioden. A og  $\delta$  bestemmes ved initialverdiene, mens rulleperioden er gitt ved

$$T = \frac{2\pi(I_M + A_{44})}{\sqrt{\Delta_W GM_V(I_M + A_{44}) - B_{44}^2/4}}$$

Weiss' formel kan videre utledes fra uttrykket over. En ser da bort fra demping, tillagt treghet ( $A_{44}=B_{44}=0$ ) og fri væske ( $GM_V = GM$ ). Videre uttrykkes treghetsmomentet som massen multiplisert med kvadratet av gyrasjonsradiusen, R. Dette gir Weiss' formel

$$T = \frac{f * B}{\sqrt{GM}} ; \quad \text{der Weiss' faktor, } f = \frac{2\pi R}{B\sqrt{g}}$$

For å besvare problemstillingen ses det i denne oppgaven imidlertid *ikke* bort fra effekten av fri væske. Uttrykket for rulleperioden vil dermed antas å ha følgende utforming:

$$T = \frac{f * B}{\sqrt{GM_V}}$$

Om dette er riktig ble testet eksperimentelt.

## 3 Metode

I dette kapitlet vil oppgavens metodevalg presenteres. I første underkapittel vil det bli gjort generelle betraktninger rundt valget av metode. I de påfølgende underkapitlene vil konkrete elementer nødvendige for å besvare oppgavens problemstilling bli ytterligere belyst.

### 3.1 Overordnet om oppgavens metode

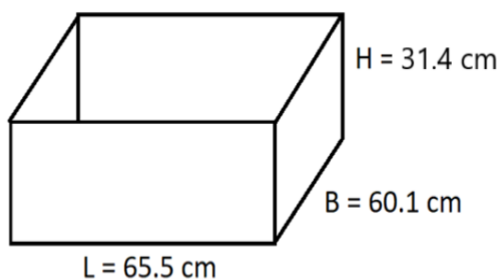
I oppgaven har det blitt benyttet et eksperimentelt design. Denne typen design er godt egnet for å bestemme kausalitet mellom variabler (Jacobsen, 2018). De uavhengige variablene tankkonfigurasjon, lastekondisjon og fyllingsgrad har gjennom de ulike forsøkene blitt manipulerte. Dette har resultert i endringer i fartøysmodellens rulleperiode, som er den avhengige variabel.

Bruk av et eksperimentelt design har gjort det mulig å innhente store mengder data fra fartøysmodellens rullerespons under et vidt spekter av forhold. Dette bidro til å øke resultatenes pålitelighet. En annen sterk side ved det eksperimentelle designet har vært at rulleresponsen har kunnet blitt observert visuelt, slik at andre forhold som påvirket fartøysmodellens bevegelser kunne avdekkes. Dette har vært medvirkende til å styrke forsøkene indre validitet, da det muliggjorde eliminering av uønskede forhold. En svak side ved bruk av eksperimentelt design kan være at den ytre validiteten er truet. Eksperimentene ble her utført under kunstige og ideelle forhold. Generalisering og bruk av oppgavens resultater for fartøy i full størrelse kan derfor ikke gjøres ukritisk.

### 3.2 Forsøksoppsettet

Forsøksoppsettet ble konstruert for å kunne besvare oppgavens problemstilling på en best mulig måte innenfor praktiske begrensinger. Oppsettet bestod av en fartøysmodell, en jigg og en vanntank.

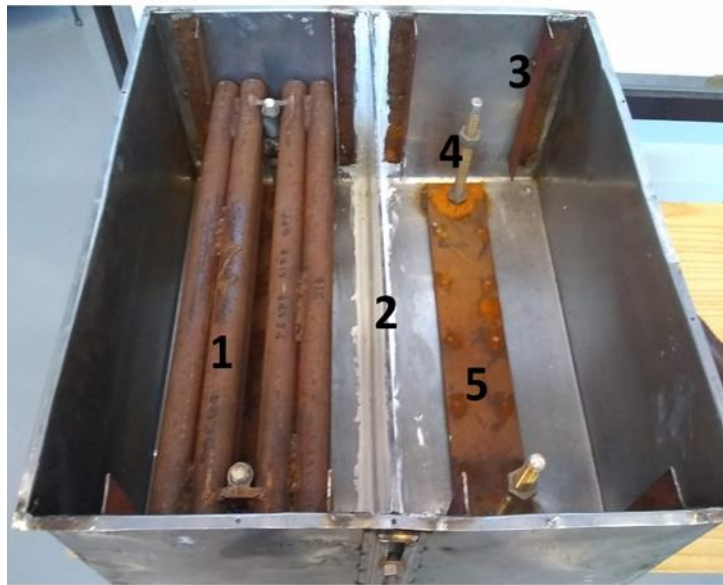
Fartøysmodellen var basert på en tverrskips tankseksjon for et virkelig tankskip (Storesund, 2008). Fartøysmodellen var formet som en åpen firkantet boks for å forenkle analytiske beregninger og konstruksjonsarbeid, dimensjoner i figuren under. Skrogets øvre kant var utformet som en 1 cm bred flens for innfesting av et lokk i plexiglass. Fartøysmodellen var rigget for to ulike tankkonfigurasjoner. I den ene fungerte hele skrogets indre som én tank, i den andre ble skroget inndelt i to tanker med en plexiglassplate montert langs langskips senterlinje. I denne oppgaven vil det noen ganger skilles mellom en-tanks og to-tanks konfigurasjon med uttrykkene uten langskipsinndeling og med langskipsinndeling.



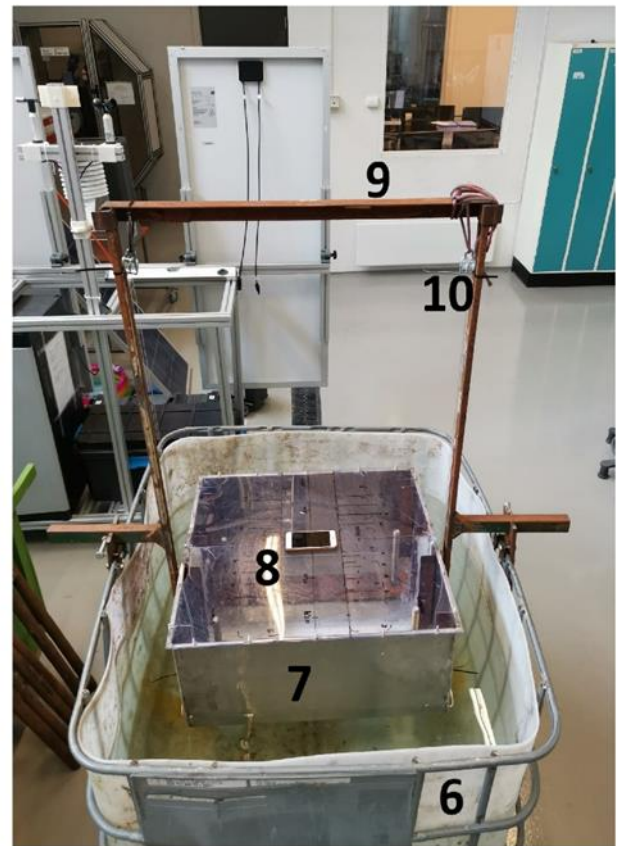
Figur 2: Fartøysmodellens dimensjoner.

I forsøksdesignet ble det lagt til grunn at den lastede modellen uten inklinasjon skulle ha samme massesenter uavhengig av fyllingsgrad. Det ble derfor installert et loddssystem med trinnløs høydejustering langs vertikale gjengestenger, se figur 3. Det ble konstruert totalt fire lodd i to sett. Det ene settet var omkring den doble vekten av det andre settet (22.80 kg per lodd og 11.60 kg per lodd). Loddene var i hver ende støttet av vinkeljern montert i skroget Dette for å hindre sideveis forskyvning under rulleforsøkene.

For å minimalisere bevegelser utover rulling og hiv, ble fartøysmodellen montert i en jigg, figur 3. Modellens rulleakse kunne settes manuelt med bolter forut og akterut. I forsøkene ble det valgt å holde rulleaksen i vannlinjen. På jiggen ble det også montert et trinsesystem som holdt modellens trim tilnærmet uforandret nær 0 under rulleforsøkene. Friksjonen i trinsesystemet ble målt til mellom 2 og 2.5 kg. For at modellen skulle bevege seg i vertikal retning krevdes altså et drag på like over 2 kg.



Nummerreferanse	Beskrivelse
1	Lodd
2	Langskipsinndeling
3	Vinkeljern
4	Gjengestang med mutter for høydejustering
5	Vektfordelingsplate
6	Vanntank
7	Fartøysmodellen
8	Lokk med telefonen på
9	Jigg
10	Trinsesystemet



Figur 3: Forsøksoppsettet

Tanken brukt i dette forsøksoppsettet var en ordinær kubikkstank av plast med rektangulært tverrsnitt, se figur over. Den ble omgjort til et åpent kar ved å fjerne toppen. Tanken hadde lengde og bredde på henholdsvis 1.2 og 1.0 m, innvendige mål. Den innvendige dybden var 0.8 m. Forsøkene ble gjennomført med en vanddybde 0.6 m.

Under konstruksjonen av fartøysmodellen ble det etter hvert som nye komponenter ble installert beregnet akkumulert deplasement, KG og treghetsmoment med usikkerhet, se vedlegg 2. Beregnet forplantet usikkerhet har vist at fartøysmodellens vektfordelingsjon har blitt bestemt med god nøyaktighet. Disse verdiene ble også verifisert gjennom en krengeprøve.

### 3.3 Forsøksutførelse

Et detaljert forsøksprogram ligger i vedlegg 1. I dette underkapittelet vil hovedtrekkene i forsøksprogrammet kort presenteres.

Forsøkene ble i all hovedsak inndelt i to hovedgrupper. I første gruppe ble det gjort forsøk der skroget var konfigurert som én tank, i andre gruppe var skroget konfigurert som to tanker med en langskipsinndeling langs modellens senterlinje. Tankkonfigurasjon er som nevnt i kapittel 3.1, en av forsøksdesignets uavhengige variabler.

For hver hovedgruppe ble det gjort forsøk med fire ulike lastekondisjoner. Lastekondisjonene beskriver hva og hvor mye som var lastet i de ulike forsøkene, og fungerte som det andre settet med uavhengige variabler. For de ulike lastekondisjonene var fartøysmodellen lastet på følgende vis:

Lastekondisjon 1	69.0 kg lodd, ingen vann.
Lastekondisjon 2	45.8 kg lodd, 23.2 kg vann. (Omtrent 1/3 vann.)
Lastekondisjon 3	23.4 kg lodd, 45.6 kg vann. (Omtrent 2/3 vann)
Lastekondisjon 4	Ingen lodd, 69.0 kg vann.

Heretter vil lastekondisjonene for enkelhetsskyld refereres til ved nummer, og gjerne også med omtrentlig andel vann. For hvert forsøk ble loddenes plassering tilpasset, slik at modellens KG og deplasement ble likt gjennom alle forsøk (dog noe ulikt for de to tankkonfigurasjonene). Lastekondisjon 1 fungerte som forsøkets kontrollgruppe, da disse forsøkene ble gjennomført uten fri væske. Rulleresponsen ved de andre lastekondisjonene kunne dermed sammenlignes med responsen i lastekondisjon 1.

For hver lastekondisjon ble det gjennomført to sett med forsøk, hvert på seks repetisjoner. Modellen ble lastet om mellom hvert sett. Seks repetisjoner gav et greit grunnlag for å



kalkulere gjennomsnittsverdier og standardavvik. Inndelingen i to sett ble gjort for å verifisere at modellen var lastet riktig, samt for å sikre resultatenes pålitelighet.

Avslutningsvis ble det besluttet å gjennomføre et sett med seks repetisjoner der modellen kun var lastet med lodd, og der modellens metasenterhøyde var lik metasenterhøyden korrigert for fri væske-effekt i lastekondisjon 2-4 med langskipsinndeling. Dette settet vil heretter for enkelhetsskyld omtales som «ad hoc».

Erfaringer gjort under forsøkene og andre notater ble loggført i egne skjema. Et eksempel på et slikt skjema ligger i vedlegg 4.

### 3.4 Datainnhenting

En mobiltelefon med integrert MPU 6700 IvenSense akselerometer ble benyttet for å logge fartøysmodellens rullerespons under forsøkene. Akselerometeret var seksakslet, og kunne fungere som treakslet gyroskop og/eller et treakslet akselerometer. Appen Matlab Mobile, versjon 7.5, ble benyttet for å overføre dataene til PC i sanntid. Azimuth, pitch, roll og tid ble logget med en samplingsfrekvens på 100 Hz.

### 3.5 Analyse av data

Etter at data fra rulleresponsen var importert til Matlab, ble den enkelte repetisjons periode bestemt ved regresjon, med en regresjonskurvene på formen

$$\theta(t) = Ae^{Bt} \cos\left(\frac{2\pi}{C}t + D\right) + E$$

Funksjonen «Curve Fit Tool» i Matlab ble benyttet for å gi en beste tilpasset verdi for koeffisientene A, B, C, D og E i uttrykket over. Koeffisienten C tilsvarer her perioden.

Perioden for settet vil i resultatkapittelet bli oppgitt som en gjennomsnittsverdi av  $C$ , for alle seks repetisjoner i settet  $\pm$  standardavviket for de seks repetisjonene.

Ved å snu på Weiss' formel ble så den implisitte Weiss' faktor kalkulert, basert på den gjennomsnittlige rulleperioden for hvert sett:

$$f = \frac{T\sqrt{GM_v}}{B}$$

For at Weiss' formel skulle kunne brukes som skissert i problemstillingen, var det påkrevd at den implisitte Weiss' faktor skulle være konstant. Dette vil i diskusjonskapittelet bli kontrollert ved å plote  $f$  med usikkerhet som funksjon av  $GM_v$ .

Verdier for demping og tillagt treghet ble også kalkulert med bakgrunn i regresjonskoeffisientene  $B$  og  $C$ . Disse verdiene var beheftet med stor usikkerhet og er ikke benyttet videre i resultat- og diskusjonskapitlene, men er tabulert i vedlegg 3.

### 3.6 Håndtering av usikkerhet

Usikkerheten i beregninger og målinger har i denne oppgaven blitt behandlet som beskrevet av Taylor (Taylor, 1997). I grove trekk har usikkerheten blitt håndtert på to ulike måter: under beregning av fartøymodellens parametere har det blitt brukt feilforplantning, mens resultatene av rulleforsøkene ble behandlet statistisk.

Under konstruksjon av modellen ble alle komponenter veid og målt, og deres plassering fastsatt i forhold til fartøysmodellens referansesystem. Det ble antatt 2 mm usikkerhet i alle målinger, hovedsakelig på grunn av at referansesystemet ikke er veldefinert. For måling av vekt ble det tatt utgangspunkt i vektens nøyaktighet, og usikkerheten i vekt for de ulike komponentene har dermed variert mellom 2 gram og 5 gram avhengig av hvilken vekt som ble brukt. For væskevolum ble det antatt en nøyaktighet på 1 %. Væskevolumet ble tidvis målt i målekolbe med ml-skala, tidvis med vekt. Disse målte verdiene ble benyttet for å beregne akkumulert vekt,  $KG$ ,  $KM$  og treghetsmoment for lettskipet og de ulike

lastekondisjonene. Usikkerheten i de beregnede verdiene er behandlet som uavhengige tilfeldige feil, og følgende generelle formel for feilforplantning har vært brukt (Taylor, 1997):

$$\delta q = \sqrt{\left(\frac{\partial q}{\partial x} \delta x\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial q}{\partial z} \delta z\right)^2}$$

Verdien av  $q$  er her en vilkårlig funksjon av variablene  $x, \dots, z$ , og usikkerheten i  $q$ ,  $\delta q$ , er altså en funksjon av de partielt deriverte og usikkerheten i de ulike variablene.

Forsøksresultatene ble behandlet statistisk. Det ble gjort to sett med seks repetisjoner for alle rulleforsøk, med unntak av ad hoc-forsøkene. Her ble det kun gjennomført et sett. For hvert sett ble det beregnet aritmetisk gjennomsnitt og standardavvik for de ulike verdiene (rulleperiode, demping, tillagt treghet etc.). Standardavviket ble her benyttet som mål på usikkerhet.

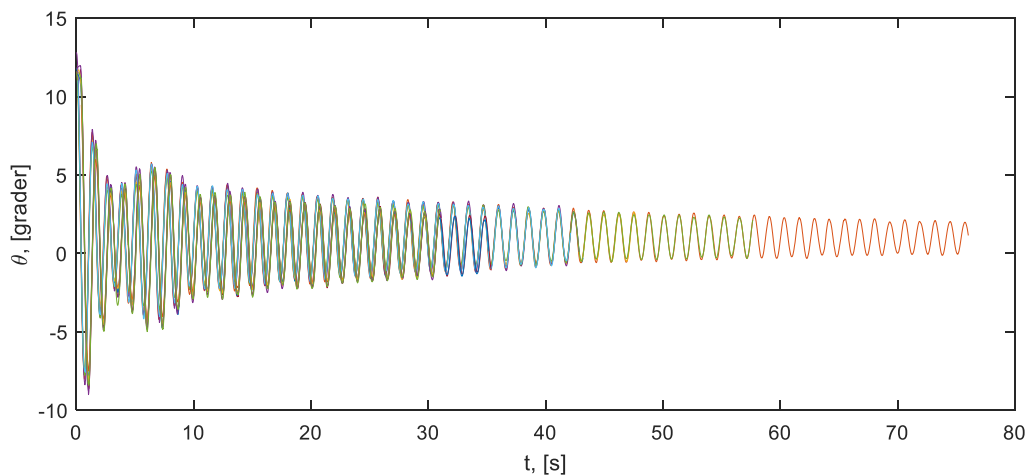
## 4 Resultat

I dette kapittelet presenteres rulleresponsen for de ulike lastekondisjonene i grafisk form. Kapittelet er delt i to underkapitler. I det første underkapittelet vil resultatene fra rulleforsøkene med langskipsinndeling bli presentert, i det andre resultatene med langskipsinndeling.

Tidsvariabelen er i de grafiske fremstillingene fasejustert, slik at de ulike repetisjonene er i fase med hverandre. Dette gjør de sammenstilte kurvene lesbare, og har ingen innvirkning på videre analyse. Videre vil perioden med usikkerhet for hvert sett av rulleforsøk bli oppgitt.

### 4.1 Uten langskipsinndeling

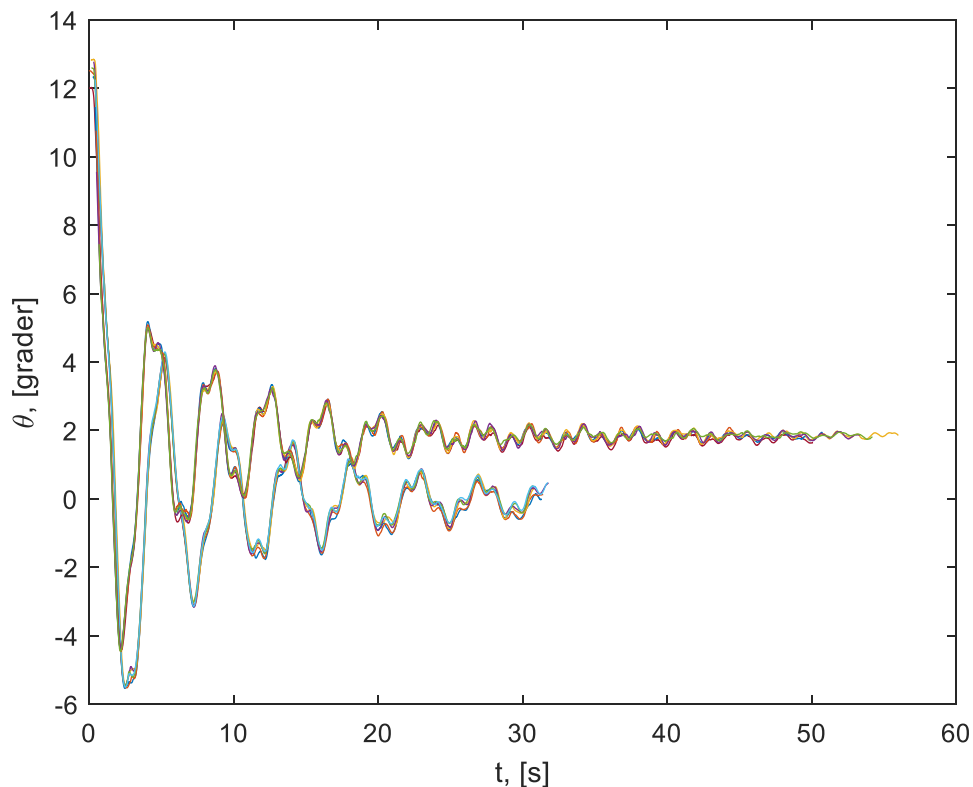
I dette underkapittelet vil data fra rulleforsøkene uten langskipsinndeling bli presentert.



Figur 4: Uten langskipsinndeling, lastekondisjon 1.

Figuren over viser rulleresponsen for samtlige sett og repetisjoner for lastekondisjon 1, altså uten vann i modellens lastetanker. En kan observere at amplituden avtar hurtig de første tre rullesyklusene, for så å stige de neste to. Videre avtar amplituden eksponentielt, men med en lavere rate enn for de første tre rullesyklusene. Dette vil undersøkes nærmere i neste kapittel.

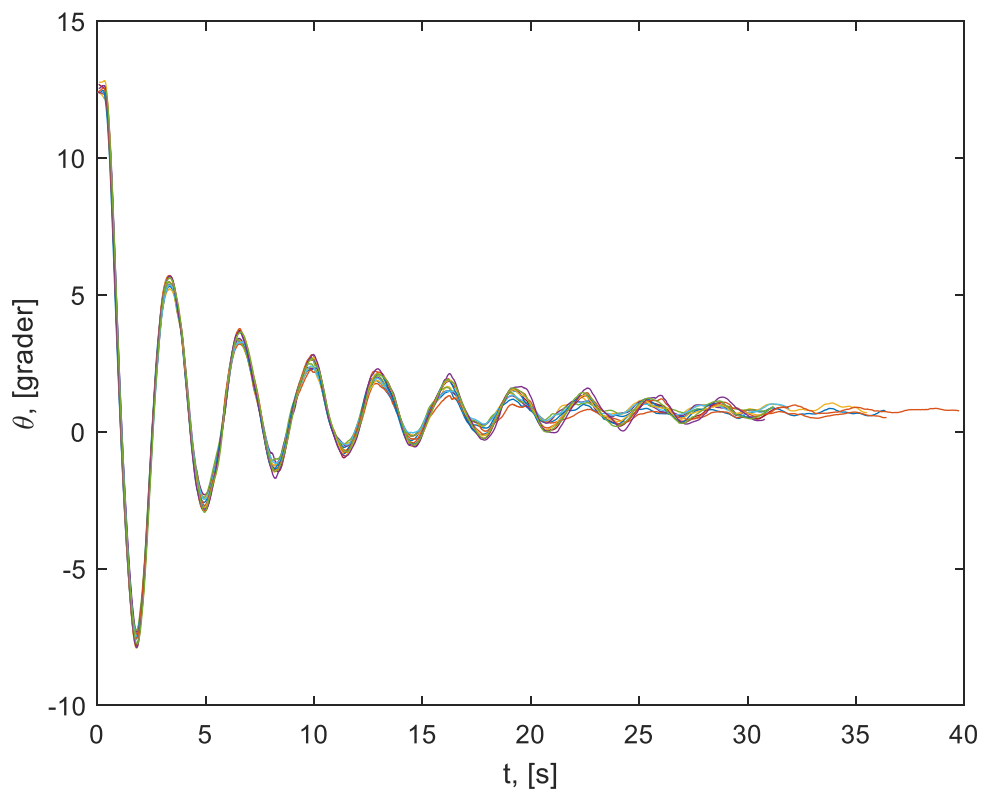
Rulleperioden for det første settet var  $1.2838 \pm 0.0004$  s, og for det andre settet  $1.2773 \pm 0.0008$  s. De to rulleperiodene med standardavvik var dermed ikke overlappende, og avviket var i størrelsesorden  $10^{-3}$  s. Dette kan indikere at modellen har hatt en noe lavere metasenterhøyde i det første settet enn i det andre settet.



Figur 5: Uten langskipsinndeling, lastekondisjon 2.

På figuren over kan en se rulleresponsen for begge sett gjennomført ved lastekondisjon 2. Her var modellen lastet med en kombinasjon av lodd og vann, der omkring 1/3 av lastens totalvekt var vann. En kan observere at rulleresponsen avviker noe fra ren sinuskurve, da ekstremalpunktene er doble. Dette vil omtales videre i diskusjonskapittelet.

Rulleperiodene for de to settene avvek fra hverandre i stor grad. Det første settets rulleperiode var  $3.86 \pm 0.06$  s, mens tilsvarende for det andre settet var  $4.399 \pm 0.005$  s. Dette indikerer at modellen ved minst ett av settene ikke var korrekt lastet. Det har ved gjennomgang av datamateriale og forsøksloggene imidlertid ikke lyktes å fastslå i hvilket av settene feilen lå. Bruk av data fra disse forsøkene i videre analyse og diskusjon ble derfor gjort med forsiktighet.

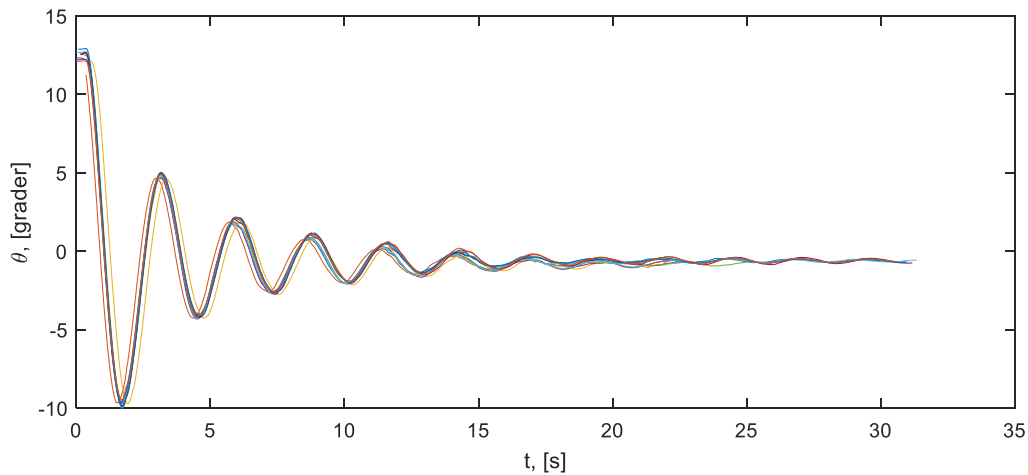


Figur 6: Uten langsipsinndeling, lastekondisjon 3.

Figuren over viser rulleresponsen for alle repetisjoner gjennomført med lastekondisjon 3. Her var modellen lastet med en kombinasjon av vann og lodd, der omtrent  $2/3$  av lastens totalvekt var vann. Rulleresponsen var i stor grad sammenfallende for samtlige repetisjoner.

Rulleperioden for det første settet var  $3.18 \pm 0.01$  s, og for det andre settet  $3.16 \pm 0.01$  s.

Rulleperiodene med standardavvik var dermed overlappende for de to settene.



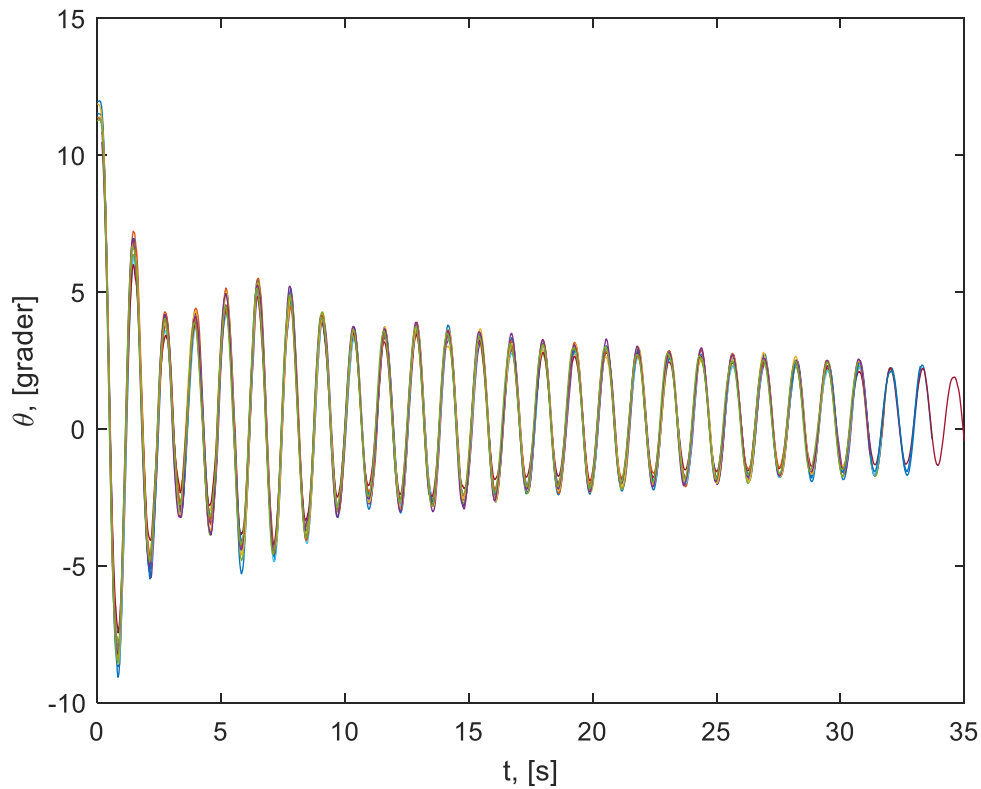
Figur 7: Uten langskipsinndeling, lastekondisjon 4.

I figuren over kan en se rulleresponsen for samtlige repetisjoner gjort med lastekondisjon 4. Her var modellen utelukkende lastet med vann. Rulleresponsen var meget lik for alle repetisjoner. Perioden for det første settet var  $2.778 \pm 0.007$  s, og for det andre settet  $2.813 \pm 0.007$  s. Rulleperiodene med standardavvik var dermed ikke overlappende for de to settene, og avviket var i størrelsesorden  $10^{-2}$  s. Dette indikerer en noe større metasenterhøyde i det første settet, enn det andre.

Rulleresponsen for de ulike lastekondisjoner har uten langskipsinndeling vist stor variasjon. Dette gjelder både for kurvenes form og de avledede rulleperiodene.

## 4.2 Med langskipsinndeling

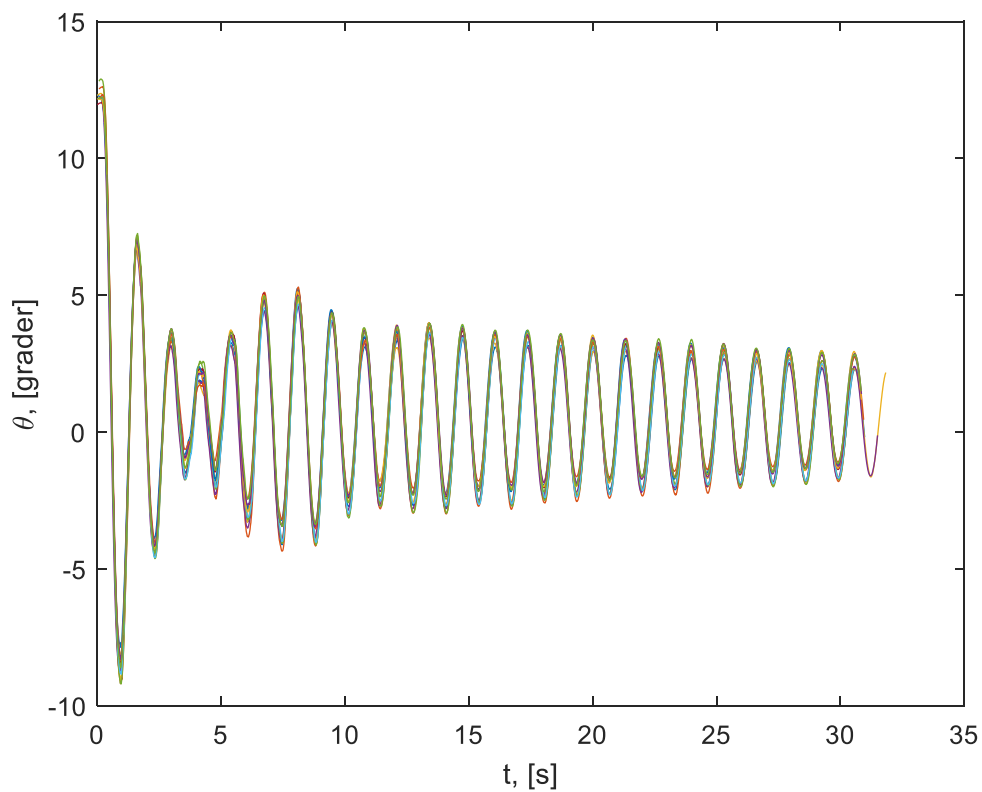
I dette underkapittelet vil data fra rulleforsøkene med langskipsinndeling bli presentert.



Figur 8: Med langskipsinndeling, lastekondisjon 1.

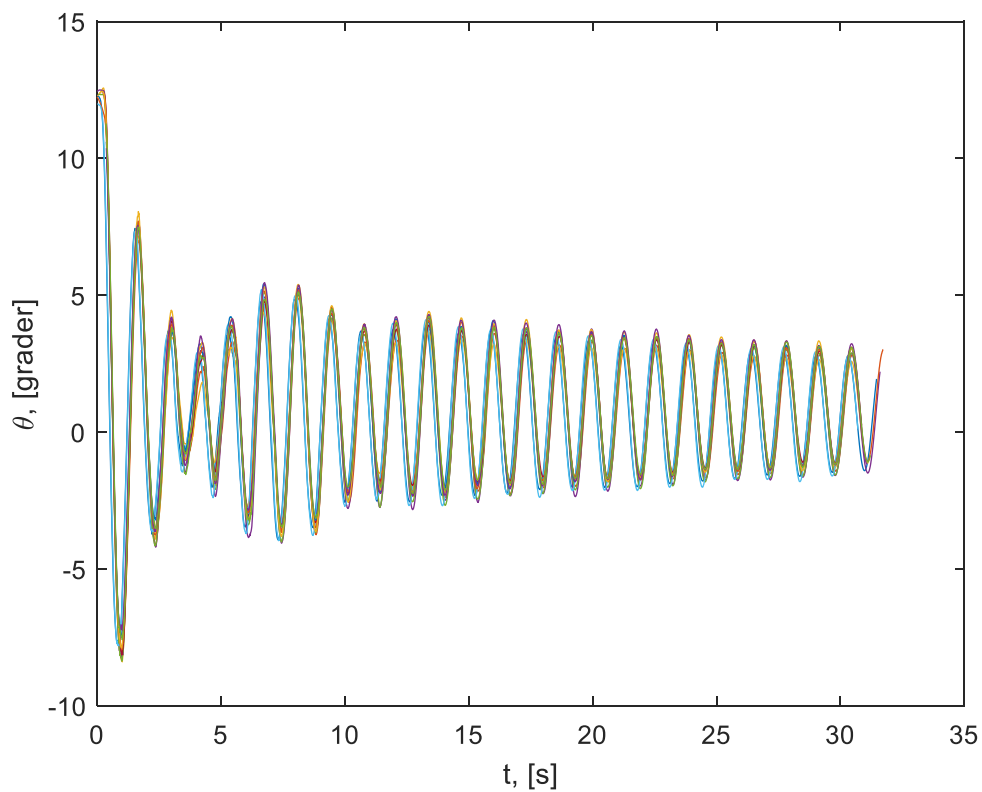
Figuren over viser rulleresponsen for alle repetisjoner gjennomført med lastekondisjon 1. Modellen var her altså lastet med kun lodd. Rulleresponsen var sammenlignbar for alle repetisjoner. Perioden for det første settet var  $1.2758 \pm 0.0008$  s, mens perioden for det andre settet var  $1.2757 \pm 0.0008$  s, og periodene med standardavvik var dermed overlappende.





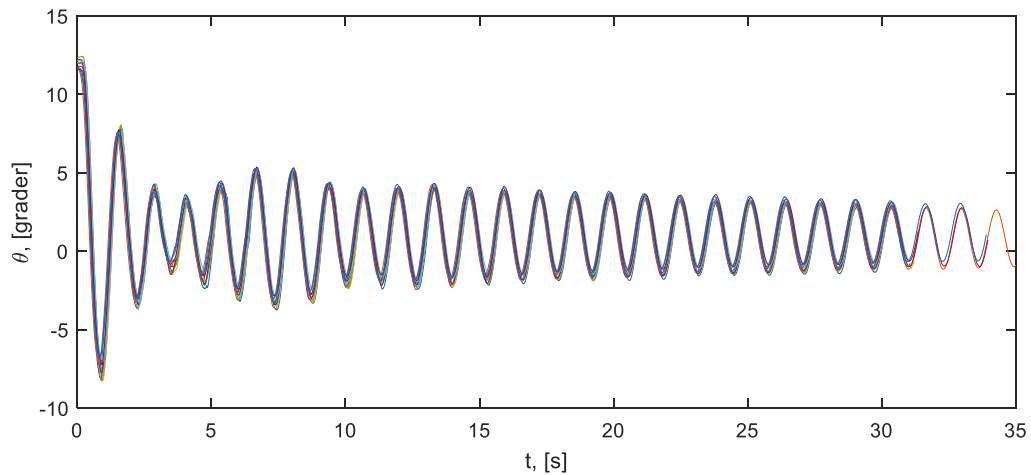
Figur 9: Med langskipsinndeling, lastekondisjon 2.

Figuren over viser rulleresponsen for alle repetisjoner gjennomført med lastekondisjon 2. Her var omkring 1/3 av lastens totalvekt vann. Rulleresponsen var i stor grad sammenfallende for samtlige repetisjoner. For det første settet var rulleperioden  $1.3197 \pm 0.0005$  s, og for det andre  $1.3187 \pm 0.0005$  s. Periodene med standardavvik for de to settene overlapper.



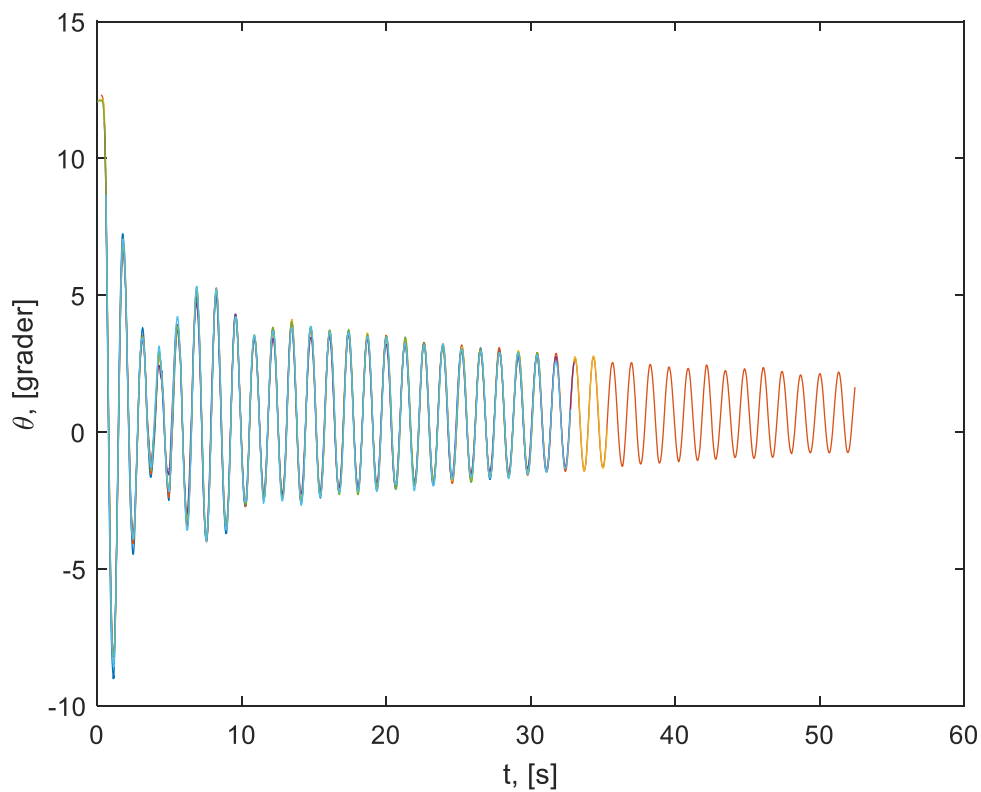
Figur 10: Med langskipsinndeling, lastekondisjon 3.

I figuren over vises rulleresponsen for alle repetisjoner gjennomført ved lastekondisjon 3. Her var omkring  $2/3$  av lastens totale vekt vann. Rulleperioden i det første settet var 1.3120 s. Her var standardavviket mindre enn  $10^{-4}$ s. I det andre settet var rulleperioden  $1.3117 \pm 0.0005$  s. Verdiene var dermed overlappende for de to settene.



Figur 11: Med langskipsinndeling, lastekondisjon 4.

Figuren over viser rulleresponsen for samtlige repetisjoner gjennomført med lastekondisjon 4. Her var modellen lastet utelukkende med vann. Rulleperioden for det første settet var  $1.3102 \pm 0.0004$  s, og for det andre settet  $1.3110$  s. Standardavviket var også her mindre enn  $10^{-4}$ s. Verdiene var her ikke overlappende, men med et avvik i størrelsesorden  $10^{-3}$  s.



Figur 12: Uten fri væske, ad hoc.

Figuren over fremstiller rulleresponsen for ad hoc-forsøkene. Rulleperioden var  $1.3047 \pm 0.0005$  s.

Rulleresponsen for de ulike lastekondisjoner har med langskipsinndeling vist langt mindre variasjon enn uten langskipsinndeling. Både kurvenes form og de avledede rulleperiodene har hatt liten spredning. Felles for alle rulleforsøkene med langskipsinndeling var en økning i amplitude i fjerde og femte rulleperiode. Dette var også tilfelle for rulleforsøkene gjennomført med lastekondisjon 1 uten langskipsinndeling. Denne effekten vil bli omtalt i neste kapittel.

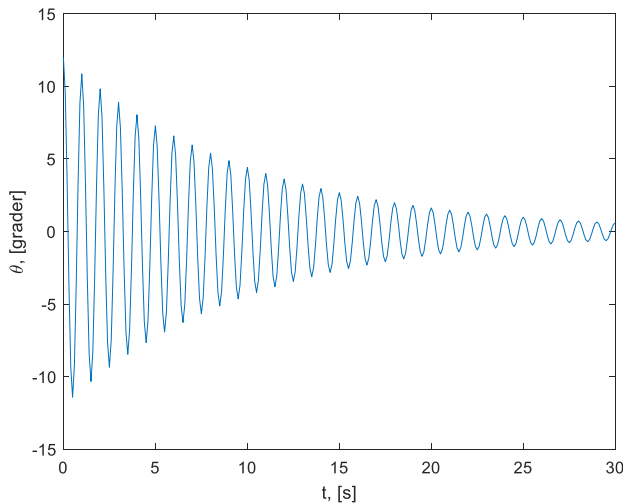
## 5 Diskusjon

I dette kapitlet vil rådata og resultatene fra forrige kapittel, bli vurdert og diskutert. Samsvar med oppgavens problemstilling vil også bli vurdert. For eventuelle avvik vil forklaringsmodeller skisseres.

### 5.1 Overordnet vurdering av data

For at de eksperimentelle resultatene skal være nyttige må de være pålitelige, gyldige og overførbare. Dette temaet ble diskutert i metodekapitlet med hensyn til metodevalg. I dette underkapitlet vil imidlertid pålitelighet og gyldighet kort diskuteres i lys av resultatene.

Pålitelighet handler om kvaliteten på målingene som er gjort. Resultatene i forrige kapittel har i stor grad vært sammenfallende, og verdienes usikkerhet har vært tilfredsstillende lave. Dette indikerer at gjennomføringen av eksperimentene har vært konsistent, og at resultatene er repeterbare ved bruk av det samme forsøksoppsettet. Resultatene for lastekondisjon 2 uten langskipsinndeling var inkonsistente. Dette indikerer dårlig pålitelighet for disse forsøkene, og det antas at det ble gjort en feil ved lasting av fartøysmodellen. Det ble valgt å ikke fullt ut forkaste data fra disse forsøkene, men å benytte resultatene med forsiktighet i videre analyse.

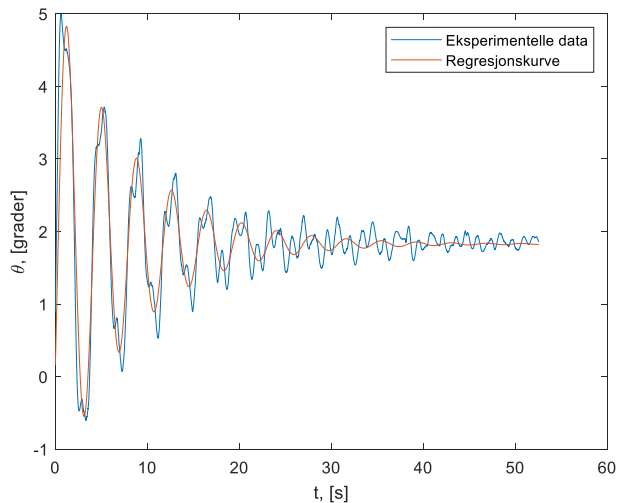


Figur 13: Idealisert fri harmonisk oscillasjon med demping

Når det gjelder gyldighet var det forventet at forsøksoppsettet i grove trekk skulle respondere med fri dempet harmonisk oscillasjon. En idealisert kurve for denne typen bevegelse er vist i figuren over. Noen overordnede observasjoner som er gjeldende for fri dempet harmonisk oscillasjon kan gjøres ut fra figuren:

- Perioden er den samme i hver rullesyklus uavhengig av amplitude (ved konstant demping og tillagt masse).
- Amplituden avtar eksponentielt med økende tid, og konvergerer asymptotisk mot 0.
- Hver enkel rullesyklus har form nært opp mot en sinuskurve.

Om den idealiserte kurven i figuren over sammenlignes visuelt med rulleresponsene fra forrige kapittel, ser en at de eksperimentelle data i grove trekk innehar de samme kvalitetene som den idealiserte kurven. Dette har også blitt verifisert ved regresjon av hvert enkelt datasett mot det matematiske uttrykket for den ideelle bevegelsen. Verdien  $R^2$  indikerer hvor godt datasettet samsvarer med det ideelle uttrykket. Gjennomsnittsverdien for  $R^2$  for samtlige rulleforsøk var over 0.99. Dette støtter at både forsøksoppsettet og de innhentede data er representative for fenomenet som har blitt undersøkt.



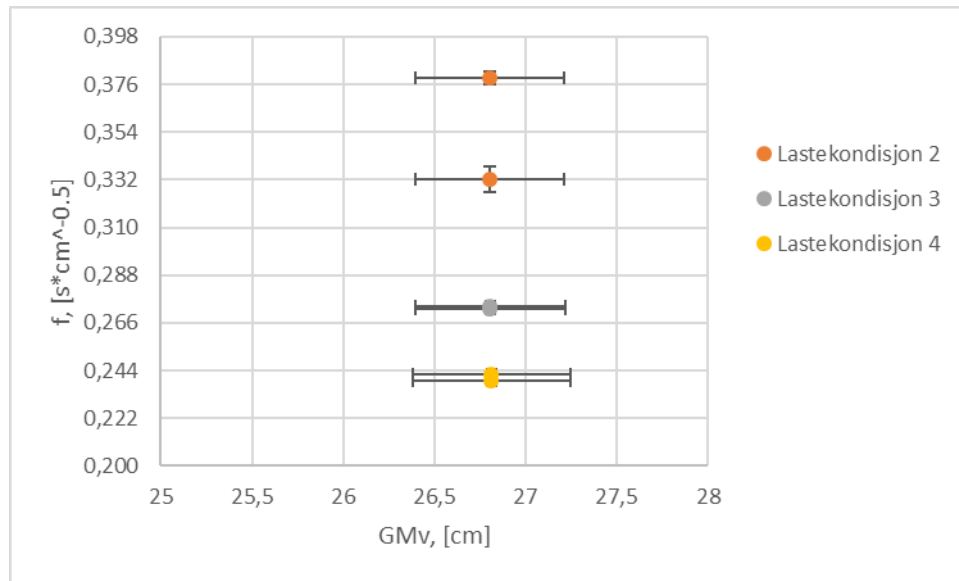
Figur 14: Sammenligning av eksperimentelle data med regresjonskurve

Den laveste verdien for  $R^2$  blant alle rulleforsøkene var 0.92. Dette forekom under lastekondisjon 2 uten langskipsinndeling. Her bestod omkring 1/3 av lastens totalvekt av vann. I figuren over sammenlignes de eksperimentelle data med regresjonskurven for dette enkelte rulleforsøket. Selv i dette tilfellet observeres brukbart samsvar med den ideelle regresjonskurven. En ser også at rulleresponsen i stor grad tilfredsstillende de overordnede observasjonene for fri dempet harmonisk oscillasjon.

Et annet avvik fra den idealiserte rulleresponsen er økningen i amplitude i fjerde og femte rullesyklus som tydelig kan observeres under flere av rulleforsøkene. Dette ble også observert visuelt under gjennomføringen av rulleforsøkene. Økningen i amplitude har sammenheng med at bølger produsert av fartøysmodellens rullebevegelse blir reflektert av vanntankens vegger. I begynnelsen av fjerde rulleperiode nådde de reflekterte bølger tilbake til fartøysmodellen, og en del av bølgenes energi ble dermed tilbakeført til rullebevegelsen gjennom en økning i amplitude. Gjennomgang av rulleresponsen for hvert enkelt forsøk har vist at dette ikke har påvirket rulleperioden i målbar grad. Denne effekten har derfor liten relevans sett i forhold til oppgavens problemstilling.

## 5.2 Vurdering av data opp mot problemstillingen

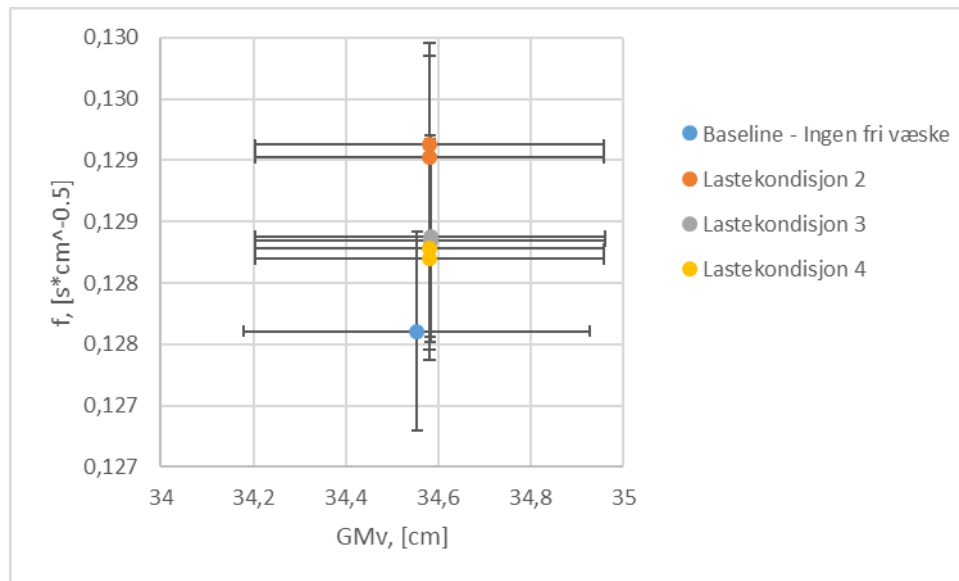
Om Weiss' formel skal kunne benyttes med slakke tanker, må Weiss' faktor være konstant for hver tankkonfigurasjon. Ved bruk av rulleperiodene funnet i forrige kapittel, har den implisitte Weiss' faktor blitt beregnet for hvert sett med rulleforsøk, med og uten fri væske.



Figur 15: Weiss' faktor uten langskipsinndeling

Figuren over viser verdiene for  $f$  for forsøkene gjennomført uten langskipsinndeling. Data for lastekondisjon 2 var inkonsistente grunnet feil lasting, men har likevel blitt inkludert i figuren som en indikasjon på et sannsynlig verdiområde for en reell verdi. Usikkerhet både i vertikal og horisontal dimensjon er vist i figuren. Det kan observeres at  $f$  varierer for de ulike lastekondisjonene. Avviket i Weiss' faktor mellom lastekondisjon 3 og 4 er i størrelsesorden  $10^1$  standardavvik, og er dermed i høyeste grad statistisk signifikant. Dette indikerer tilsynelatende at Weiss' formel ikke kan benyttes ved slakke tanker.





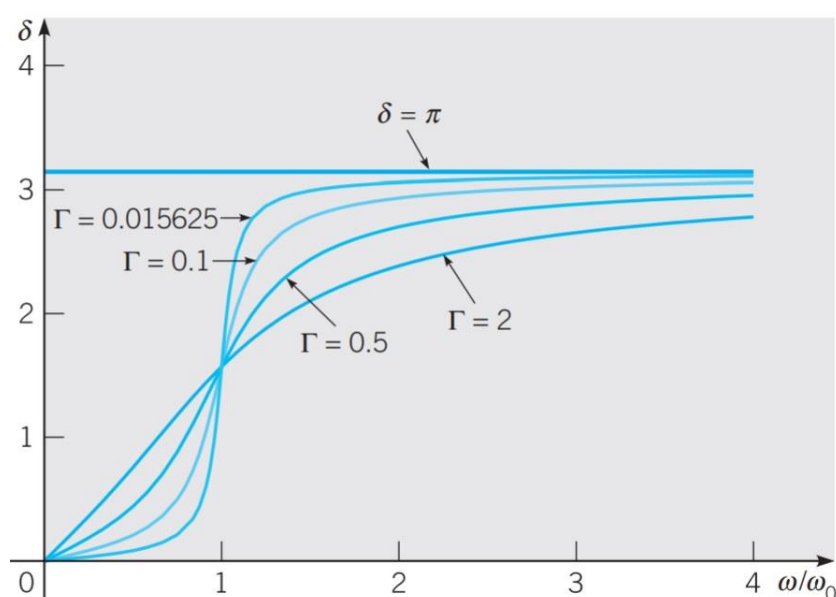
Figur 16: Weiss' faktor med langskipsinndeling

Figuren over viser Weiss' faktor kalkulert for rulleforsøkene gjort med langskipsinndeling. Her er avviket mellom høyeste og laveste verdi for Weiss' faktor for de ulike lastekondisjonene omlag 1 %. Sett i sammenheng med tallenes usikkerhet er avvikene i dette tilfellet ikke signifikante. Hvordan kan Weiss' faktor synes å være konstant ved en tankkonfigurasjon, men ikke i den andre? I neste underkapittel vil en mulig forklaringsmodell skisseres og drøftes.

### 5.3 En forklaringsmodell

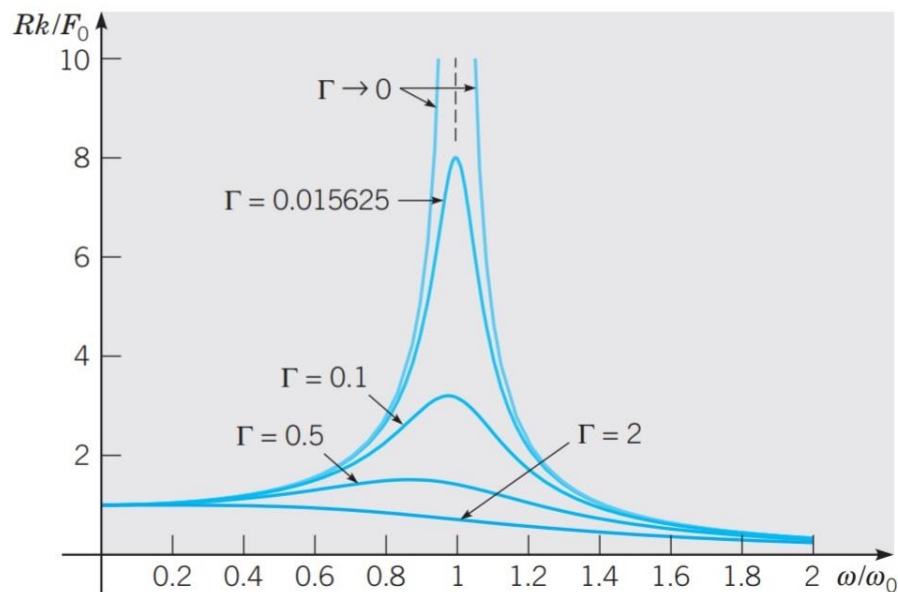
Den matematiske modellen utledet i teorikapittelet beskrev forsøksoppsettet som et enkeltstående uavhengig system. En forutsetning for den matematiske modellen var at den frie væsken oppfører seg kvasistatisk, og dermed alltid i fase med fartøysmodellens bevegelser. I den matematiske modellen ble det også sett bort fra bølgene som oppstår i vanntanken. Dette er i realiteten ikke riktig. Det kan være riktigere å se på forsøksoppsettet som tre elementer som vekselvirker med hverandre. Det ene elementet er fartøysmodellens skrog, det andre elementet er den frie væsken i modellens tanker, og det tredje er bølgene som dannes, og reflekteres i vanntanken. Det er mulig å beskrive det totale systemet matematisk. Det vil da ta form som et ligningssystem med flere differensialligninger. Her vil det likevel utelukkende bli gjort overordnede betraktninger basert på kjent teori omkring tvungen oscillasjon.

Ved å se på teorien rundt tvungen oscillasjon, kan en skissere hvordan en løsning av ligningssystemet nevnt over vil se ut. Ved tvungen oscillasjon vil et system eksiteres av en fast harmonisk drivkraft. Dette forekommer for eksempel for et fartøy i bølger med fast frekvens og amplitude. Bølgene vil da drive fartøyets bevegelse, og fartøyet vil etter hvert bevege seg i stabil tvungen oscillasjon med samme frekvens som bølgene. Avhengig av forholdet mellom bølgenes periode og fartøyets egenperiode vil gjerne fasen være forskjøvet. Et annet eksempel på tvungen oscillasjon vil være om et fartøy ruller med fast frekvens og amplitude. Den frie væsken i fartøyets slakke tanker vil etter hvert i grove trekk bevege seg i stabil tvungen oscillasjon.



Figur 17: Faseforskyvning (Boyce & DiPrima, 2012)

Figuren over viser faseforskyvningen mellom drivkraftens fase, og den tvungne oscillasjonens fase målt i radianer som en funksjon av forholdet mellom drivkraftens frekvens og systemets egenfrekvens. Om en anser fartøysmodellens respons som tvungen, uttrykker det dimensjonsløse tallet  $\Gamma$  forholdet mellom kvadratet av dempingen og produktet av systemets treghet og det gjenopprettende moment. For forsøkene gjennomført uten slakke tanker, har  $\Gamma$  en verdi i størrelsesorden  $10^{-4}$ . Det observeres av figuren at uansett verdi for  $\Gamma$ , vil faseforskyvningen være nær null når drivkraftens frekvens er mye mindre enn det tvungne systemets egenfrekvens, og gå mot  $180^\circ$  når drivkraftens frekvens er mye større enn det tvungne systemets egenfrekvens. Når frekvensene er like er systemet i resonans, og faseforskyvningen vil være  $90^\circ$ .



Figur 18: Forhold mellom den tvungne oscillasjonens amplitude og drivkraftens amplitude ved likevekt. (Boyce & DiPrima, 2012)

Figuren over viser forholdet mellom den tvungne oscillasjonens amplitude og drivkraftens amplitude ved likevekt (steady state). Kurvene er også her plottet som funksjon av forholdet mellom drivkraftens frekvens og systemets egenfrekvens. Det kan observeres at ved et lavt forhold mellom frekvensene, vil drivkraftens og den tvungne oscillasjonens amplitude være like, og ved et høyt forhold vil den tvungne oscillasjonens amplitude gå mot 0. Når drivkraftens frekvens og systemets egenfrekvens er like, og  $\Gamma$  er lav, vil den tvungne oscillasjonen få en høy amplitude.

Settes dette i sammenheng med oppgavens problemstilling og det eksperimentelle oppsettet, ser man at det var ingen faste harmoniske drivkrefter som styrte systemets bevegelser. Her vekselvirket derimot alle tre elementer med hverandre med ulik grad av dominans for de forskjellige tankkonfigurasjoner. En tanks dempende effekt, øker jo større andel den frie væske-effekten utgjør av fartøyets totale metasenterhøyde (Faltinsen, 1990). For forsøkene gjennomført uten langskipsinndeling var dette forholdstallet 48%, mens det var like under 1% for forsøkene med langskipsinndeling. Bruk av Weiss' formel vil dermed kunne antas å være riktigere i det siste tilfellet enn i det førstnevnte. Dette samsvarer også med Weiss' erfaringer, da han hadde problemer med å få gode resultater for lastede og delvis lastede tankskip (Weiss, 1953).

Videre kan en se på egenperiodene for forsøksoppsettets tre elementer. Vannet i vanntanken, hadde en egenperiode på 1.3 s. Selve fartøysmodellen hadde under de ulike lastekondisjoner en egenperiode på mellom 1.3 og 1.7 s avhengig av lastekondisjon, med en gjennomsnittsverdi på 1.4 s. Den frie væsken hadde uten langskipsinndeling en gjennomsnittlig egenperiode på 1.3 s, mens tilsvarende verdi med langskipsinndeling var 0.7 s.

For forsøkene gjennomført uten langskipsinndeling, hadde systemets tre elementer alle tilnærmet lik egenperiode, og systemet kan dermed på et vis sies å være i resonans. Ut fra figurene over ser en at både amplituder og faseforskyvning da ligger i et svært uforutsigbart område. Dette blir ytterligere forsterket av at verdien for  $\Gamma$  var lav. En liten endring av frekvensforholdet i dette område vil gjøre at elementene fra å gå i tilnærmet fase med hverandre, går i motfase. Det vil også gi store utslag i de ulike elementers amplitude.

Visuelle observasjoner støtter opp om disse betraktningene. Under forsøkene uten langskipsinndeling responderte både fartøysmodellen og den frie væsken meget uryddig. Dette gjaldt spesielt i forsøkene med lavest fyllingsgrad, se figur 14. Her ble den frie væsken også til en grad påvirket av strukturene inne i modellens skrog. Dette medvirket til de doble ekstremalpunktene som vises tydelig i figuren. Videre kan dette også ha medvirket til inkonsistensen i målte rulleperioder under lastekondisjon 2. En minimal unøyaktighet i lasting av fartøysmodellen vil kunne forventes å gi store utslag i rulleperiode når egenfrekvensene er i nærheten av resonans.

For forsøkene med langskipsinndeling var frekvensforholdet 0.5, og fra figurene over ser en at forholdstallet mellom de ulike elementers amplitude vil være nær 1. Faseforskyvningen vil også være svært liten. Dette gjenspeiles i at forsøksoppsettet i dette tilfellet, i stor grad responderte i samsvar med Weiss' formel.

I dette underkapittelet har det blitt forsøkt å skissere en forklaring på hvorfor Weiss' formel syntes å gi gode resultater i noen tilfeller, mens den absolutt ikke stemte i andre tilfeller. Kort oppsummert kan det se ut som om rulleperioden for et fartøy med slakke tanker, kan estimeres med brukbar grad av nøyaktighet ved bruk av Weiss' formel kompensert for fri væske-effekt når:

- 1) Fartøyets metasenterhøyde er betydelig større enn den frie væske-effekten, slik at fartøyets rullebevegelse driver den frie væskebevegelsen, og ikke motsatt.
- 2) Den frie væskes egenperiode er betydelig mindre enn fartøyets naturlige rulleperiode, slik at faseforskyvningen og amplitudeforstørringen blir minimal.

## 6 Konklusjon

I denne bacheloroppgaven har den naturlige rulleperioden for fartøyer med slakke tanker blitt undersøkt. Weiss' formel gir en sammenheng mellom fartøyets naturlige rulleperiode og dets metasenterhøyde. Denne sammenhengen er i all hovedsak beregnet for tilfeller uten slakke tanker. I oppgaven har det imidlertid blitt sett på om formelen kan anvendes også med slakke tanker, dersom metasenterhøyden kompenseres for fri væske-effekt.

Data fra de gjennomførte forsøkene synes i all hovedsak å være av god kvalitet. Når det gjelder pålitelighet har det blitt gjort en stor mengde rulleforsøk. Data fra disse har for hver lastekondisjon i stor grad vært konsistente, og beheftet med liten usikkerhet. Stabilitetsdata for de ulike lastekondisjoner har blitt kalkulert med forplantet usikkerhet. Også her har usikkerheten vært liten. Resultatenes gyldighet virker tilsynelatende å være god.

Rulleforsøkene ble observert visuelt, slik at uønskede påvirkninger kunne avdekkes og tas høyde for. Gyldigheten har også til dels blitt kontrollert ved regresjon av datasettene mot det generelle uttrykket for fri dempet harmonisk oscillasjon. Overførbarhet av resultatene til fartøy i full størrelse kan likevel ikke gjøres ukritisk, da forsøkene ble utførte under kunstige og ideelle forhold.

Forsøkene resultater er sprikende. I eksperimentene der modellen var konfigurert med en lastetank, avvok den målte rulleperioden signifikant fra det som var forventet ved bruk av Weiss' formel. I dette tilfellet hadde den frie væske-effekten en stor innvirkning.

Forholdstallet mellom den virtuelle reduksjonen i metasenterhøyde og fartøyets totale metasenterhøyde var 48 %. Analyser viste også at fartøyets teoretiske naturlige rulleperiode, og den frie væskes egenperiode var i nærheten av hverandre. På denne måten kan systemet sies å ha vært i resonans. Det er derfor ikke unaturlig at responsen var uforutsigbar.

Der modellen var konfigurert med to lastetanker, indikerer resultatene godt samsvar med Weiss' formel. Systemet ble med denne tankkonfigurasjonen dominert av modellens gjenopprettende moment, da forholdet mellom virtuell reduksjon i metasenterhøyde og total metasenterhøyde var 1 %. I disse tilfellene var også frekvensforholdet 0.5, i et område uten faseforskyvning og amplitudeforsterkning av betydning.

Det kan konkluderes med at svaret på problemstillingen ikke er entydig. I noen tilfeller synes bruk av Weiss' formel med metasenterhøyde kompensert for fri væske-effekt, å samsvare bra med eksperimentelle resultater, i andre tilfeller ikke. Teoretiske betraktninger har antydnet at dette kan ha sammenheng med den frie væskes grad av dominans i systemet sett i forhold til fartøyets metasenterhøyde. Ved liten grad av dominans kan det se ut som om samsvaret er tilfredsstillende. Et annet element som synes viktig, er forholdet mellom fartøyets naturlige rulleperiode og den frie væskes egenperiode. Er den frie væskes egenperiode i nærheten av eller større enn fartøyets naturlige rulleperiode, vil bruk av Weiss' formel ikke være tilrådelig.

Denne oppgaven kan ha noe betydning og relevans i praktiske anvendelser som blant annet bestemmelse av et fartøys metasenterhøyde ved rulletesting, ved konstruksjon og bruk av passive anti-rullesystemer, samt for en bedre overordnet forståelse for fartøys bevegelser underveis. Tematikken kan også være interessant rent teoretisk, da litteraturstudiet har indikert at vekselvirkning mellom rulling og fri væske uten en ytre harmonisk drivkraft tidligere har vært lite belyst. Det må imidlertid presiseres at ytterligere forskning er påkrevd for en fullstendig forståelse for gyldighetsområdet for Weiss' formel for fartøy med slakke tanker.

# Referanser

- Barras, C., & D.R. Derrett. (2012). *Ship Stability for Masters and Mates* (Vol. VII). Waltham, USA: Butterworth-Heinemann.
- Bergdahl, L. (2008). *Wave-Induced Loads and Ship Motions*. Chalmers university of Technology , Water Environment Technology. Göteborg: CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY.
- Boyce, W. E., & DiPrima, R. C. (2012). *Elementary Differential Equations and Boundary Value Problems*. United States Of America: John Wiley & Sons, Inc.
- Eswaran, M., & Saha, U. K. (2011). Sloshing of Liquids in Partially Filled Tanks - A Review of Experimental Investigations. *Ocean Systems Engineering, Vol. 1*, ss. 131-155.
- Faltinsen, O. M. (1990). *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*. Cambridge, Storbritannia : Cambridge Univeristy Press.
- Falzarano, J., Somayajula, A., & Seah, R. (2015). An Overview of the Prediction Methods for Roll Damping of Ships. *Ocean Systems Engineering*, ss. 55-76.
- Froude, W. (1861). On the Rolling of Ships. *Trans INA, 2*, ss. 180-227.
- Himeno, Y. (1981). Prediction of Ship Roll Damping - State of the Art. Ann Arbor, Michigan, USA: University of Michigan.
- Ikeda, T., Ibrahim, R. A., & Pilipchuck, V. (2001). Recent Advances in Liquid Sloshing Dynamics. *Applied Mechanics Reviews*, ss. 133-199.
- IMO. (1993). *International Code on Intact Stability, Resolution A.749 (18)*. London , England.
- Jacobsen, D. I. (2018). *Hvordan gjennomføre undersøkelser?* . Cappelen Damm Akademisk.
- Kawahara, Y., Maekawa, K., & Ikeda, Y. (2012). A Simple Prediction Formula of Roll Dampin of Conventional Cargo Ships on the Basis of Ikeda's Methods and it's Limitation. *Journal of Shipping and Ocean Engineering*.
- Prasanna, D. (2014, Mai 8). *Hubpages*. Hentet 2019 fra <https://hubpages.com/travel/theshipmotionsatsea>
- Rognsaa, A. (2015). *Bacheloroppgaven - Skriveråd og regler for utformingen*. Oslo: Universitetsforlaget.
- Storesund, E. (2008, August). Information Booklet. Haugesund, Norge: Stord/Haugesund University College (Nautical Studies).
- Søder, C.-J., Rosén, A., & Huss, M. (2019). Ikeda Revisited. *Journal of Marine Science and Technology*.
- Taylor, J. R. (1997). *An Introduction to Error Analysis*. Sausalito: University Science Books.
- Weiss, G. (1953). Erfahrungen mit der Stabilitätsprüfung durch Roll versuche. *Hansa*, s. 1271.



# Vedlegg

## Vedlegg 1: Forsøksprogram

I alle rulleforsøk benyttes lodd slik at fartøyets massesenter og deplasement er likt for de ulike lastekondisjoner.

### 1. Krengeprøve

#### 1.1 Verifisere modellens L/S deplasement ved veiing.

Stropp opp modellen og vei i bagasjevekt. Trekk fra stroppenes vekt og noter i logg.

#### 1.2 Måle modellens lettskips dypgang.

Mål modellens dypgående langs langskips senterlinje, forut og akterut.

#### 1.3 Verifisere modellens tyngdepunkt ved krengeprøve.

Lodd plasseres i posisjoner markert på lokk. Krenkning leses av i hver posisjon og noteres i regneark. Gjennomføres inntil usikkerhet i  $KG < 1$  cm.

### 2. Måling av rulleperiode med en tank

#### 2.1 Uten vann.

Modellen lastes med et stort og et lite lodd på hver side, totalt 68.8 kg lodd + justeringsmutre 0.244 kg. De største loddene plasseres øverst og de minste på bunn.

Loddene plasseres med topp mutter i høyde 31.6 mm over topp spreaderplate.

- a) Dykkerlodd plasseres i posisjonene 1-5 markert på lokk. Krenkning leses av i hver posisjon og noteres. Gjennomføres en gang.

- b) Bestemme rulleperioden. Modellen gis  $12^\circ$  inklinasjon og slippes. Data logges med akselerometer og overføres til MatLab. Gjennomføres seks ganger.
- c) Last modellen på ny og gjenta punkt a og b.

#### 2.2 Vann 1/3 av lastens totalvekt.

Modellen lastes med et stort lodd på hver side, totalt 45.6 kg lodd + justeringsmutre 0.244 kg. Skroget fylles med 23.2 l vann. Loddene plasseres med topp mutter i høyde 86.7 mm over topp spreaderplate.

- a) Dykkerlodd plasseres i posisjonene 1-5 markert på lokk. Krenkning leses av i hver posisjon og noteres. Gjennomføres en gang.
- b) Bestemme rulleperioden. Modellen gis  $12^\circ$  inklinasjon og slippes. Data logges med akselerometer og overføres til MatLab. Gjennomføres seks ganger.
- c) Last modellen på ny og gjenta punkt a og b.

#### 2.3 Vann 2/3 av lastens totalvekt.

Modellen lastes med et lite lodd på hver side, totalt 23.2 kg lodd+ justeringsmutre 0.244 kg. Skroget fylles med ytterligere 22.4 liter vann, slik at dette inneholder totalt 45.6 liter vann. Modellen monteres even keel i jig. Loddene plasseres med topp mutter i høyde 114.9 mm over topp spreaderplate.

- a) Dykkerlodd plasseres i posisjonene 1-5 markert på lokk. Krenkning leses av i hver posisjon og noteres. Gjennomføres en gang.
- b) Bestemme rulleperioden. Modellen gis  $12^\circ$  inklinasjon og slippes. Data logges med akselerometer og overføres til MatLab. Gjennomføres seks ganger.
- c) Last modellen på ny og gjenta punkt a og b.

#### 2.4 Kun vann.

Alle lodd fjernes. Skroget fylles med ytterligere 23.42 liter vann, slik at dette inneholder totalt 69.02 liter vann. Modellen monteres even keel i jig.

- a) Dykkerlodd plasseres i posisjonene 1-5 markert på lokk. Krenkning leses av i hver posisjon og noteres. Gjennomføres en gang.
- b) Bestemme rulleperioden. Modellen gis  $12^\circ$  inklinasjon og slippes. Data logges med akselerometer og overføres til MatLab. Gjennomføres seks ganger.
- c) Last modellen på ny og gjenta punkt a og b.

### 3. Måling av rulleperiode med to tanker

Monter langskipsinndeling.

#### 3.1 Uten vann.

Gjenta forsøk 2.1 med lodd plassert med topp mutter i høyde 32.2 mm over topp spreaderplate.

#### 3.2 Vann 1/3 av lastens totalvekt.

Gjenta forsøk 2.3 med lodd plassert med topp mutter i høyde 87.5 mm over topp spreaderplate.

#### 3.3 Vann 2/3 av lastens totalvekt.

Gjenta forsøk 2.3 med lodd plassert med topp mutter i høyde 115.9 mm over topp spreaderplate.

#### 3.4 Kun vann.

Gjenta forsøk 2.4.

#### 3.5 Ad hoc

3.6 Gjenta forsøk 3.1 med lodd plassert med topp mutter i høyde 74.6 mm over topp spreaderplate.

## Vedlegg 2: Stabilitetsdata for de ulike lastekondisjoner

Lastekondisjon	Vekt, [g]	Usikkerhet, [g]	KG, [cm]	Usikkerhet, [cm]	KG justert for fri væske, [cm]	Usikkerhet, [cm]	KM, [cm]	Usikkerhet, [cm]	Tregghet, [kg*dm <sup>2</sup> ]	Usikkerhet, [kg*dm <sup>2</sup> ]
	Lettskip uten langskips inndeling	22970	5	9,7	0,1	9,7	0,1	55,5	0,4	124
Lettskip med langskips inndeling	24238	5	9,9	0,1	9,9	0,1	52,9	0,4	127	3
Lastekondisjon 1 uten langskips inndeling	91994	9	9,0	0,1	9,0	0,1	24,6	0,1	356	3
Lastekondisjon 2 uten langskips inndeling	92000	200	9,0	0,1	21,9	0,2	24,6	0,1	306	4
Lastekondisjon 3 uten langskips inndeling	92000	500	9,0	0,1	21,9	0,2	24,6	0,1	230	3
Lastekondisjon 4 uten langskips inndeling	92000	700	9,0	0,2	21,9	0,2	24,6	0,2	124	3
Lastekondisjon 1 med langskips inndeling	93262	9	9,1	0,1	9,1	0,1	24,6	0,1	359	3
Lastekondisjon 2 med langskips inndeling	93300	200	9,1	0,1	12,2	0,1	24,6	0,1	310	4
Lastekondisjon 3 med langskips inndeling	93300	500	9,1	0,1	12,2	0,1	24,6	0,1	233	3
Lastekondisjon 4 med langskips inndeling	93300	700	9,1	0,1	12,2	0,1	24,6	0,2	127	3
Ad hoc	93262	9	12,2	0,1	12,2	0,1	24,6	0,1	423	4

### Vedlegg 3: Regresjonskoeffisienter og kalkuleerte verdier

A	Regresjonskoeffisienter										Kalkuleerte verdier									
	Usikkerhet, [kg cm <sup>-2</sup> ]	B, [°-1]	Usikkerhet, [°-1]	C, [s]	Usikkerhet, [s]	D, [deg]	Usikkerhet, [deg]	E, [deg]	Usikkerhet, [deg]	R <sup>2</sup>	Usikkerhet	f, [° cm <sup>-1</sup> 0.5]	Usikkerhet, [° cm <sup>-1</sup> 0.5]	A44, [kg cm <sup>-2</sup> ]	Usikkerhet, [kg cm <sup>-2</sup> ]	B44, [kg cm <sup>-2</sup> /s]	Usikkerhet, [kg cm <sup>-2</sup> /s]	Gamma		
Beskrivelse																				
Lastekondisjon 1 uten langskips inndeling, sett 1	2	0.3	-0.020	0.001	1.2838	0.0004	1	1.03	0.01	0.9962	0.0004	0.1346	0.0008	423000	5100	20000	20000	0.0002		
Lastekondisjon 1 uten langskips inndeling, sett 2	4.2	0.3	-0.025	0.001	1.2773	0.0008	-0.6	0.8	0.02	0.994	0.02	0.1339	0.0008	419000	5100	20000	20000	0.0003		
Lastekondisjon 2 uten langskips inndeling, sett 1	5	1	-0.129	0.008	3.86	0.06	-0.8	0.7	1.81	0.96	0.96	0.332	0.006	2800000	100000	700000	700000	0.08		
Lastekondisjon 2 uten langskips inndeling, sett 2	7.4	0.2	-0.123	0.004	4.399	0.005	-0.7	0.2	-0.03	0.983	0.02	0.379	0.003	3780000	60000	900000	900000	0.09		
Lastekondisjon 3 uten langskips inndeling, sett 1	9	3	-0.18	0.04	3.18	0.01	-0.2	0.3	0.8	0.1	0.992	0.274	0.002	1980000	40000	700000	700000	0.1		
Lastekondisjon 3 uten langskips inndeling, sett 2	5.0	0.6	-0.10	0.01	3.16	0.01	-0.5	0.2	0.76	0.03	0.9978	0.0009	0.003	1920000	40000	400000	400000	0.03		
Lastekondisjon 4 uten langskips inndeling, sett 1	14	2	-0.274	0.009	2.778	0.007	-0.7	0.8	-0.5	0.7	0.993	0.242	0.002	1540000	30000	900000	800000	0.2		
Lastekondisjon 4 uten langskips inndeling, sett 2	13.6	0.7	-0.259	0.005	2.813	0.008	-0.4	0.4	-0.60	0.994	0.02	0.242	0.002	1570000	30000	800000	800000	0.2		
Lastekondisjon 1 med langskips inndeling, sett 1	4.3	0.3	-0.025	0.001	1.2758	0.0008	0	1	0.35	0.03	0.995	0.1303	0.0008	395000	5000	20000	20000	0.0003		
Lastekondisjon 2 med langskips inndeling, sett 1	4.2	0.3	-0.025	0.001	1.2757	0.0008	-0.7	0.9	0.47	0.02	0.9931	0.1303	0.0008	400000	5000	20000	20000	0.0003		
Lastekondisjon 2 med langskips inndeling, sett 2	4.3	0.2	-0.024	0.001	1.3197	0.0005	-0.9	0.5	0.40	0.05	0.9953	0.1291	0.0008	405000	5000	20000	20000	0.0003		
Lastekondisjon 3 med langskips inndeling, sett 1	4.1	0.1	-0.023	0.001	1.3187	0.0005	-0.6	0.9	0.81	0.02	0.995	0.1284	0.0008	480000	5000	20000	18000	0.0002		
Lastekondisjon 3 med langskips inndeling, sett 2	4.0	0.2	-0.021	0.001	1.3120	0	-1	1	0.68	0.03	0.996	0.1284	0.0008	411000	5000	28000	17000	0.0002		
Lastekondisjon 4 med langskips inndeling, sett 1	4.0	0.1	-0.023	0.001	1.3102	0.0004	-1.1	0.1	0.97	0.03	0.9958	0.1283	0.0008	417000	5000	20000	19000	0.0002		
Lastekondisjon 4 med langskips inndeling, sett 2	3.9	0.1	-0.023	0.001	1.3110	0	0	1	1.1	0.1	0.9968	0.1283	0.0008	418000	6000	20000	19000	0.0003		
Ad hoc	4.1	0.2	-0.021	0.001	1.3047	0.0005	0	1	0.69	0.02	0.994	0.1276	0.0008	388000	5000	18000	17000	0.0002		

## Vedlegg 4: Eksempel på forsøkslogg

### Logg

Forsøk nummer: 2.1 Dato/tid:17.02.2019						
Plassering av last						
	Babord			styrbord		
topp	lhht markering			lhht markering		
bunn	lhht markering			lhht markering		
Verdier						
Dypgang forut: ( 23.8 ) akterut: ( 23.8 )						
Plassering :	Plassering 1	Plassering 2	Plassering 3	Plassering 4	Plassering 5	
Roll etter:	3.71	4.94	0.98	-1.69	-3.51	
Pitch etter:	-1.10	-1.11	-1.13	-1.08	-1.00	
Forsøk	1	2	3	4	5	6
T	ok	ok	ok	ok	ok	ok
<p>Kommentarer:</p> <p>Etter beregning ble boltene gjort fast i høyde 23.0 cm over kjøll. Etter lasting viste det seg at vannlinjen lå noe høyere og boltene ble flyttet til 23.8 cm over kjøll. Dette stemte bra med vannlinjen.</p> <p>Ellers var alle enig om at det hadde vært en fin dag på labben.</p>						