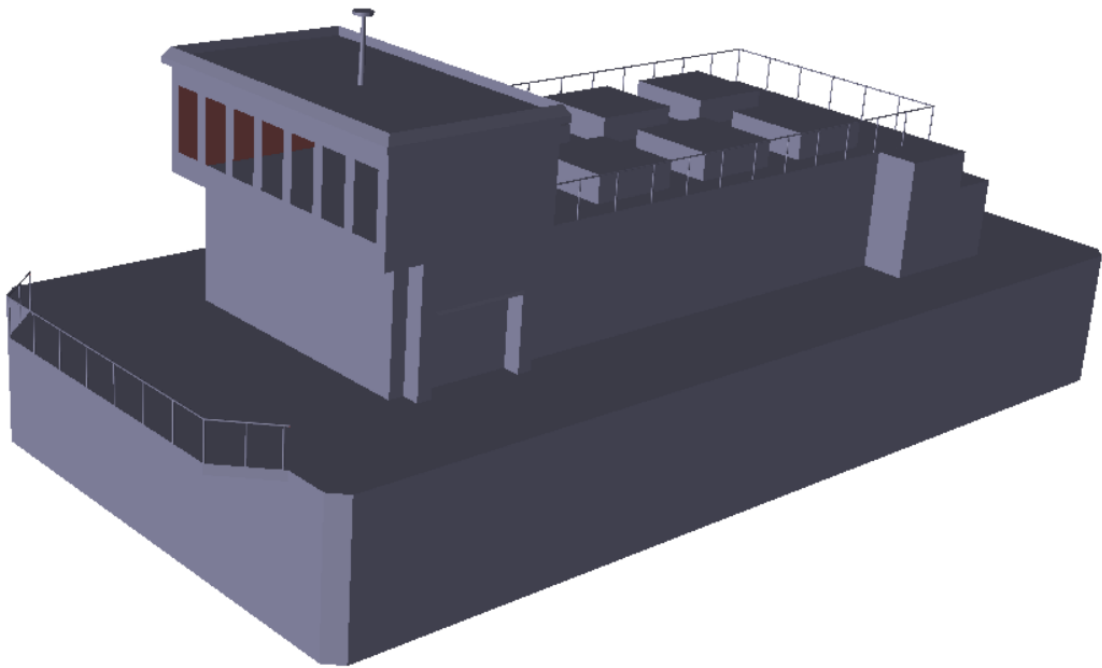




# Høgskulen på Vestlandet

Bevegelser i forflåte plassert på utsatte lokasjoner



Bacheloroppgave i Marinteknikk

Martin Rørtveit Vestbø, 170520@stud.hvl.no

Njål Hagen Holsvik, 231057@stud.hvl.no

Preben Aarland Aga, 180325@stud.hvl.no





## Bevegelser i fôrflåte plassert på utsatte lokasjoner

Martin Rørtveit Vestbø

Njål Hagen Holsvik

Preben Aarland Aga

Institutt for Maskin- og Marinfag  
Høgskulen på Vestlandet  
NO-5063 Bergen, Norge

Høgskulen på Vestlandet  
Fakultet for Ingeniør- og Naturvitenskap  
Institutt for maskin- og marinfag  
Inndalsveien 28  
NO-5063 Bergen, Norge

*English title:* *Motions on feed barge at exposed locations*

Forfatter(e), studentnummer: Martin Rørtveit Vestbø, 170520  
Njål Hagen Holsvik, 231057  
Preben Aarland Aga, 180325

Studieprogram: Marinteknikk  
Dato: Mai 2020  
Rapportnummer: IMM 2020-M34  
Veileder ved HVL: Thore Clifford Thuestad  
Oppdragsgiver: Endúr Sjøsterk  
Oppdragsgivers referanse: Øyvind Risnes

Antall filer levert digitalt: 2

IMM 2020-M34

## Forord

Denne bacheloroppgaven er et prosjekt ved Institutt for Maskin- og Marinfag (IMM) ved Høgskulen på Vestlandet, og er skrevet for Endûr Sjøsterk. Denne rapporten er en del av studieløpet for Marinteknikk og skal omhandle kunnskap som er relevant innen emnet.

Å skrive denne bachelor-rapporten har vært krevende, men også veldig lærerikt og givende. Som følge av Covid19 situasjonen har skriveprosessen blitt litt annerledes enn vi så for oss, men vi begynte tidlig med oppgaven og har jobbet kontinuerlig godt. De siste to månedene har vi ikke kunnet være på skolen eller i lag for å skrive oppgaven, men ved hjelp av hyppige videosamtaler med gruppen og med veileder, har skriveprosessen gått bedre enn en kunne forventet.

Vi vil gjerne rette en stor takk til vår veileder ved HVL, Thore Clifford Thuestad som har fulgt oss opp gjennom hele skriveprosessen med gode innspill og stødig veiledning. Vi vil også takke Endûr Sjøsterk for et godt samarbeid om å kunne få det best mulige resultatet.



## Sammendrag

Denne rapporten tar for seg en hydrodynamisk analyse av en oppdrettsflåte som er plassert på utsatte lokasjoner. For at dette skal kunne gjennomføres må flåten først modelleres og testes for stabilitetskrav i henhold til standarder som gjelder for oppdrettsflåter. I rapporten drøftes de hydrodynamiske resultatene basert på globale bevegelser, akselerasjoner i styrhus og relative bevegelser for å se om det oppstår overslag av vann over dekk. I tillegg skal resultatene i rapporten sammenlignes med foregående forskning for å se om det er store forskjeller i resultat. Det konkluderes med at flåten overskrider kravene for vertikal og lateral akselerasjon, i tillegg til at det forekommer overslag av vann over dekk ved de fleste sjøtilstandene. For å redusere fare for skade på personell om bord på flåten, blir det i konklusjonen anbefalt å installere sensorer som måler bevegelser, ha så høye karmen som mulig på dørene, og at disse må være vanntette.





## Abstract

This report contains a hydrodynamic analysis of a feed barge at exposed locations. For this to be possible, the barge must first be modeled and tested for stability requirements in accordance with the standards applicable to feed barges. The report discusses the hydrodynamic results based on global movements, accelerations in wheelhouse and relative movements to see if water overlap occurs. In addition, the results of the report should be compared with previous research to see if there are any large differences in the results. It is concluded that the barge exceeds the requirements for vertical and lateral acceleration, in addition to the occurrence of water overlays in most sea conditions. In order to reduce the risk of injury to personnel on board the barge, it is recommended to install sensors that measure movement, have as high frames as possible on the doors, and that these must be waterproof.



## Innhold

|  |     |
|--|-----|
| Forord .....                                       | i   |
| Sammendrag .....                                   | iii |
| Abstract .....                                     | v   |
| Nomenklatur .....                                  | ix  |
| 1.0 Innledning.....                                | 1   |
| 1.1 Problemstilling.....                           | 1   |
| 1.2 Tidligere forskning.....                       | 1   |
| 2.0 Regelverk og retningslinjer .....              | 2   |
| 2.1 Oppdrettsanlegg.....                           | 2   |
| 2.2 Strømhastighet .....                           | 2   |
| 2.3 Bølgeparametere.....                           | 3   |
| 2.3.1 Beregning av bølger ut fra strøklengde ..... | 3   |
| 2.3.2 Befaring .....                               | 3   |
| 2.3.3 Bruk av bølgekart.....                       | 3   |
| 2.4 Krav som gjelder flåter .....                  | 4   |
| 2.4.1 Fribord .....                                | 4   |
| 2.4.2 Stabilitetskrav .....                        | 5   |
| 2.4.3 Akselerasjon i kritiske punkt .....          | 5   |
| 3.0 Metode.....                                    | 6   |
| 3.1 Beskrivelse av fartøyet .....                  | 6   |
| 3.2 Beregningsverktøy.....                         | 8   |
| 3.2.1 GeniE .....                                  | 8   |
| 3.2.2 HydroD .....                                 | 9   |
| 3.2.3 Postresp.....                                | 10  |
| 3.2.4 Xtract .....                                 | 11  |
| 3.3 Lokasjon .....                                 | 19  |
| 3.3.1 Valg av nullkryssningsperiode ( $T_z$ )..... | 19  |
| 3.4 Hydrostatikk og stabilitet .....               | 23  |
| 3.4.1 Oppdrift, metasenter og tyngdepunkt.....     | 23  |
| 3.4.2 Rettende moment .....                        | 24  |
| 3.4.3 GZ-kurven .....                              | 25  |
| 3.4.4 Last kondisjoner .....                       | 27  |
| 3.5 Hydrodynamiske beregninger .....               | 28  |
| 3.5.1 Bestemmelse av kritiske punkter.....         | 28  |

|   |    |
|---|----|
| 3.5.2 Fribord .....   | 30 |
| 3.5.3 Egenperiodene til flåten .....                                      | 30 |
| 3.5.4 Relative bevegelser mellom punkt på flåten og overflateheving ..... | 30 |
| 3.5.5 Akselerasjon og rotasjon .....                                      | 32 |
| 4.0 Resultater .....  | 33 |
| 4.1 Hydrostatiske resultater .....  | 33 |
| 4.2 Hydrodynamiske resultater .....                                       | 35 |
| 4.2.1 Sammenligning av flåter $H_s = 1.0$ [m] [3] .....                   | 35 |
| 4.2.2 $H_s = 3.5$ [m] <i>lettskips</i> .....                              | 38 |
| 4.2.3 $H_s = 3.5$ [m] <i>fullastet</i> .....                              | 45 |
| 4.2.4 $H_s = 5.5$ [m] <i>lettskips</i> .....                              | 52 |
| 4.2.5 $H_s = 5.5$ [m] <i>fullastet</i> .....                              | 57 |
| 5.0 Diskusjon .....   | 63 |
| 6.0 Konklusjon .....  | 64 |
| 7.0 Videre arbeid .....   | 65 |
| Tabell liste .....  | 66 |
| Figurer .....   | 68 |
| Kildeliste .....  | 69 |

## Nomenklatur

|           |  |
|-----------|--|
| RAO       | Response Amplitude Operator                          |
| NS        | Norsk Standard                                       |
| DNV GI    | Det Norske Veritas Germanischer Lloyd                |
| COG       | Center of Gravity                                    |
| AP        | Aktre Perpendikulær                                  |
| FP        | Forre Perpendikulær                                  |
| RMS       | Root Mean Square                                     |
| M-Rad     | Meterradianer  |
| $T_p$     | Topp-periode [s]                                     |
| $T_z$     | Nulloppekrysningsperiode [s]                         |
| Tresp     | bølgeperiode som gir størst utslag [s]               |
| $H_s$     | Signifikant bølgehøyde [m]                           |
| $\zeta$   | Bølgehevning [m]                                     |
| $\rho$    | Vanntetthet [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]               |
| $\omega$  | Vinkelfrekvens [rad/s]                               |
| f         | Frekvens [Hz]  |
| g         | Tyngdeakselerasjon [ $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ ] |
| n         | Antall   |
| E         | Energi [ $\frac{\text{J}}{\text{m}^2}$ ]             |
| $\gamma$  | Spisshetsparameter i JONSWAP-spekteret               |
| $\sigma$  | Standardavvik  |
| $\Delta$  | Vektdeplasement [Tonn]                               |
| $\nabla$  | Volumdeplasement [ $\text{m}^3$ ]                    |
| $f_{min}$ | Minste tillatte fribord [m]                          |
| $V_c$     | Strømhastighet [ $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ ]       |
| $\alpha$  | asymmetri faktor                                     |



## 1.0 Innledning

Norge har alltid vært en stolt fiskerinasjon og vårt fiskeri kan dateres helt tilbake til steinalderen. Så tidlig som 1100-tallet begynte Norge å eksportere fisk som handelsvare til utlandet. I dag er produksjonen av oppdrettsfisk 1000 doblet fra starten av 1970-tallet, og ingen annen norsk industri kan måle seg med tanke på økonomisk suksess og vekst [1].

I 2018 var det 1015 lokaliteter i Norge som driver med oppdrett av laks og regnbueørret i sjø [2]. Tar man med andre fiskearter, skalldyr og alger øker antallet lokaliteter til 1290 lokaliteter [2]. Med tanke på Norges langstrakte kystlinje, skulle man tro det var tilstrekkelig med sjøareal for stadig flere sjøbaserte anlegg, men dette er, og vil bli en stadig større utfordring for industrien. Oppdrettsnæringen dekker i dag 490 kvadratkilometer av Norges sjøareal innenfor grunnlinjene [1].

Dette fører til at man må trekke seg ut av de kystområdene hvor anleggene kan ligge i le for vær og vind og plasseres på mer værutsatte lokasjoner. På bakgrunn av dette er følgende problemstilling utarbeidet.

### 1.1 Problemstilling

På bakgrunn av et økende behov for at fôrflåter brukt i oppdrettsnæringen skal kunne plasseres på stadig mer utsatte lokasjoner og med tanke på flåtens høye egenvekt og begrensede bevegelser skal følgende vurderes:

- Vil flåtens begrensede bevegelser variere i takt med bølgehøyde, bølgeperiode og bølgeretning.
- Hvor stor eksponering av grønn sjø (vann over dekk) vil denne sjøtilstanden mest sannsynlig føre til.
- Hvilke tiltak bør innføres for å trygge arbeidsforholdene om bord.

### 1.2 Tidligere forskning

Denne rapporten er ikke en fortsettelse på tidligere forskning, men det sammenlignes metode og resultat med tidligere forskning for å se om resultatene virker fornuftige. Grunnet mangel på krav er det ikke mye tidligere forskning på hydrodynamiske analyser av fôrflåter. Bevegelserne til en fôrflåte må være innenfor kravene om stabilitet, men det er ingen krav om overslag av vann og ugunstige bevegelser for personell om bord. Fra tidligere forskning har Sintef laget en rapport som tar for seg stabilitet, samt en hydrodynamisk analyse av en fôrflåte. I denne rapporten blir resultatene drøftet og sammenlignet mot Sintef's rapport for å se om resultatene er relativt like. Det er viktig å nevne at det finnes ulikheter mellom modellen Sintef brukte i sin forskning og «SalMar», som blir brukt i denne rapporten. Sintef's modell er av stålskrog og er da betydelig mye lettere enn SalMar som er bygd av betong. I tillegg blir det brukt forskjellige analyseverktøy. I denne forskningen skal SalMar være konstruert for å kunne tåle bølger med signifikant bølgehøyde på 5,5 [m]. I Sintef rapporten ble det undersøkt for signifikant bølgehøyde på én og to [m].

Alle disse faktorene spiller inn, men ved å sammenligne resultat med Sintef rapport kan det drøftes om resultatene virker logiske med tanke på forskjellene mellom modellene.

### *Sintef rapport*

Rapporten «Stabilitet og sikkerhet for havbruksflåter i sjøgang» skrevet av Jørgen R. Krokstad og Morten Lønseth [3], er initiert som en følge av arbeidet med etablering av en ny norsk teknisk standard på havbruksanlegg som også inkluderer flåter. Rapporten er et begrenset forstudium. Følgende aktiviteter ble prioritert i dette innledende studiet [3]

- Hydrostatisk stabilitetsanalyse av en typisk førflåte, i operasjon (lastet) og skadet tilstand. På en eksempelflåte av stål.
- Hydrodynamisk analyse av samme konstruksjon med vekt på bevegelser, akselerasjon og sannsynlighet for overslag av vann over dekk (grønn sjø) ved forskjellige eksponeringsgrad.
- Arbeidet baseres på nye krav dokumentert i standard NS9415, kapittel 7 «krav til flåter/lekter» [12]

Flåten (videre omtalt som Sintef) som er benyttet er en stålflåte med følgende dimensjoner og vekt [3]:

$$L_{pp} = 32.2 [m] \text{ (lengde mellom perndikulærer)}$$

$$B = 12.9 [m] \text{ (bredde)}$$

$$D = 3.1 [m] \text{ (dekkshøyde over kjøll)}$$

$$M = 497087 [kg] \text{ (deplasement masse)}$$

## 2.0 Regelverk og retningslinjer

Regelverk og retningslinjer er en sentral del av denne rapporten. Dette fordi det stilles krav til de resultatene som kommer frem i rapporten. De regelverkene som er relevant for denne rapporten er gitt av Norsk Standard og retningslinjer gitt av DNVGL. For resultatene som ikke stilles krav til, vil det bli henvist og sammenlignet med tidligere forskning.

### *Gjengivelse av NS9415[12]*

#### 2.1 Oppdrettsanlegg

Lokasjoner som brukes til oppdrett, skal klassifiseres etter eksponeringsgrad. Dette kan være for eksempel bølgehøyde og strømhastighet. Hovedkomponentene og totalanlegget skal være dimensjonert for å tåle de maksimalverdiene som eksponeringsparameterne gir. En lokasjon kan ikke standardiseres siden ingen lokasjon er identisk. Anleggene må derfor analyseres opp mot den ønskelige lokaliteten

#### 2.2 Strømhastighet

For beskrivelse av strømforholdene på en lokasjon skal det tas måling av strøm eller bruke tidligere strømmålinger. Måling av strømhastigheter skal fremskaffes ved hjelp av målinger på minst fire ukers



varighet på lokaliteten. Disse målingene skal foretas på henholdsvis 1 [m] og 15 [m] under sjøoverflaten. Dersom det er foretatt slike målinger på lokaliteter med samme klassifisering, kan disse dataene brukes forutsett at kvaliteten på dataene er tilsvarende gode.

## 2.3 Bølgeparametere

For å beskrive bølgeforholdene skal en av følgende fremgangsmåter benyttes:

### 2.3.1 Beregning av bølger ut fra strøklengde

I områder som primært er utsatt for vindgenererte bølger, skal man beregne bølgene med utgangspunkt i kjente data for vind samt strøklengde målt opp fra sjøkart. Signifikant bølgehøyde bestemmes ut fra effektive strøklengder og vindfart for 10 minutters middelvind.

### 2.3.2 Befaring

Et estimat av relevante bølgeparametere skal etableres på bakgrunn av befaring på lokaliteten. Det skal innhentes opplysninger fra lokalkjente som er i stand til å gi et estimat for de største bølgene som opptrer på lokaliteten i løpet av et år. Estimaten skal anses å tilsvare ett års signifikant bølgehøyde. 50 års signifikant bølgehøyde for vindsjø skal så beregnes ved å multiplisere med en faktor på 1.25. Tilsvarende for havsjø ved å multiplisere med en faktor på 1.3. En annen form for å estimere denne signifikante bølgehøyden kan gjøres ved å måle hvor høyt bølgene slår opp langs land på vegetasjonen over vannivå, eller hvor høyt rek ved, tang og lignende er skylt opp langs vannkanten og, om bølger går over kaier.

### 2.3.3 Bruk av bølgekart

Data fra bølgekart, som for eksempel statens kartverk, sjøkartverket, skal brukes som kilde for bølgeangivelse på en lokalitet. Etter at en av følgende metoder er benyttet, kan man klassifisere lokasjonen etter hvilken bølgeklasse som er aktuell i *Tabell 1* eller strømklasser i

*Tabell 2*. Et eksempel på en bølge og strømklasse kan være Aa. Denne betegnelsen sier at bølgeklassen og strømklassen har liten eksponering.

*Tabell 1: Lokalitetsklasser – klassifikasjon av lokalitet på bakgrunn av signifikant bølgehøyde*

| Bølgeklasse | Hs [m]      | Tp [s]     | Betegnelse          |
|-------------|-------------|------------|---------------------|
| A           | 0,0 – 0,5   | 0,0 – 2,0  | Liten eksponering   |
| B           | 0,5 – 1,0   | 1,6 – 3,2  | Moderat eksponering |
| C           | 1,0 – 2,0   | 2,5 – 5,1  | Stor eksponering    |
| D           | 2,0 – 3,0   | 4,0 – 6,7  | Høy eksponering     |
| E           | $H_s > 3,0$ | 5,3 – 18,0 | Svær eksponering    |

Tabell 2: Lokalitetsklasser – klassifisering av lokalitet på bakgrunn av strømhastighet

| Strømklasser | Vc [m/s]  | Betegnelse          |
|--------------|-----------|---------------------|
| a            | 0,0 – 0,3 | Liten eksponering   |
| b            | 0,3 – 0,5 | Moderat eksponering |
| c            | 0,5 – 1,0 | Stor eksponering    |
| d            | 1,0 – 1,5 | Høy eksponering     |
| e            | >1,5      | Svær eksponering    |

I denne rapporten er det kun klassifisering som gjelder bølgeklasser som benyttes. Denne klassifiseringen skal videre brukes for å beregne minimum fribord. Strømklasser og vind er ikke tatt hensyn til i denne rapporten på grunn av manglende informasjon om lokasjon.

## 2.4 Krav som gjelder flåter

Fra standarden NS9415 er det ingen direkte krav i forbindelse med bevegelser i fôrflåten, foruten fribordskravet. Det er heller ingen krav til vertikale og horisontale akselerasjoner.

### 2.4.1 Fribord

Fribordet midtskips skal bestemmes ut fra stabilitet, trim og skrogstyrke. Dette er fribordets designvannlinje. Følgende krav gjelder for fribordet,  $f_{min}$ :

$$f_{min} > 17 \cdot L_{pp} + K_1 + K_2 [mm] \quad [2.1]$$

$L_{pp}$  = flåtens/lekterens største lengde angitt i meter

$K_1$  = bestemt av bølgekategori i henhold til tabell 10

$K_2$  = ekstra fribordskrav ved kryssfortøyning, satt til  $\frac{2000}{B}$ , der B er bredde

Tabell 3: Fribordskrav i forhold til bølgekategori i tabell 1

| Bølgekategori | $K_1$ |
|---------------|-------|
| A             | 300   |
| B             | 400   |
| C             | 500   |
| D             | 600   |
| E             | 700   |

#### 2.4.2 Stabilitetskrav

Stabilitetsanalysen gjennomføres på følgende lasttilstander og følger NS9415 regelverk [12]. Det vil ikke gjennomføres en sjekk på skadet tilstand da denne analysen kun er for å verifisere at modellert flåte er tilstrekkelig for hydrodynamiske analyser.

Tabell 4: Stabilitetskrav intakt

| Intakt   |
|--|
| 1. Arealet under GZ-kurven fra 0 grader til maksimalt rettende arm skal ikke være mindre enn 0,08 [m-rad]  |
| 2. 0,05 [m-rad] brukes dersom flåte/lekter er ubemannet eller flåten er plassert på lokalitet med bølgehøyde tilsvarende lokalitetsklasse C. med ubemannet flåte/lekter menes fartøy der det ikke er mulighet for overnatting  |
| 3. Statisk krenkning forårsaket av en jevnt fordelt last pålydende 0,54 KPa (tilsvarende vindfart 30 m/s), skal ikke overskride en krengevinkel tilsvarende halve fribordet i gjeldene tilstand. Armen i vindmomentet skal måles fra senter i arealet vinden virker på til halve dypgangen |
| 4. GZ skal være positiv til 15 grader som et minimum   |

#### 2.4.3 Akselerasjon i kritiske punkt

Siden det ikke oppgis noen direkte krav til vertikale eller horisontale akselerasjoner til fôrflåten, vil akselerasjonene i denne rapporten sammenlignes med NORDFORSK sine verdier som sier at for tungt manuelt arbeid skal responsverdiene av en rull eller horisontal og vertikal akselerasjon i et kritisk punkt på dekket være mindre enn:

$$\text{Horisontal akselerasjon} \quad 0,07g = 0,69 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

$$\text{Vertikal akselerasjon} \quad 0,15g = 1,47 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

$$\text{Rull} \quad 4 \text{ grader [4]}$$

Sintef klassifiserer arbeid som utføres ombord på fôrflåter som tungt manuelt arbeid [3].

### 3.0 Metode

Dette kapitlet omhandler fremgangsmåten for å kunne svare på problemstillingen. Her blir det blant annet presentert hvilke program som brukes og de viktigste egenskapene hvert program har. Videre vil valgene som gjøres for å løse problemstillingen på best måte beskrives.

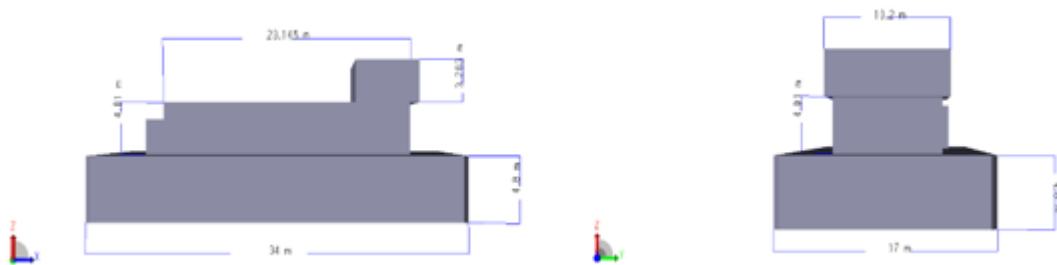
#### 3.1 Beskrivelse av fartøyet

Flåten (videre omtalt som SalMar) er en flytende betongkonstruksjon bestående av et betongskrog og aluminium overbygg. SalMar har en last kapasitet på opptil 600 tonn og er sertifisert for en signifikant bølgehøyde på til og med 5.5 [m]. Følgende hoveddimensjoner er hentet fra tekniske tegninger levert av Endúr sjøsterk.

$$L_{pp} = 34 \text{ [m]} \text{ (lengde mellom perpendikulærer)}$$

$$B = 17 \text{ [m]} \text{ (bredde)}$$

$$D = 4,8 \text{ [m]} \text{ (dekkshøyde over kjøll)}$$



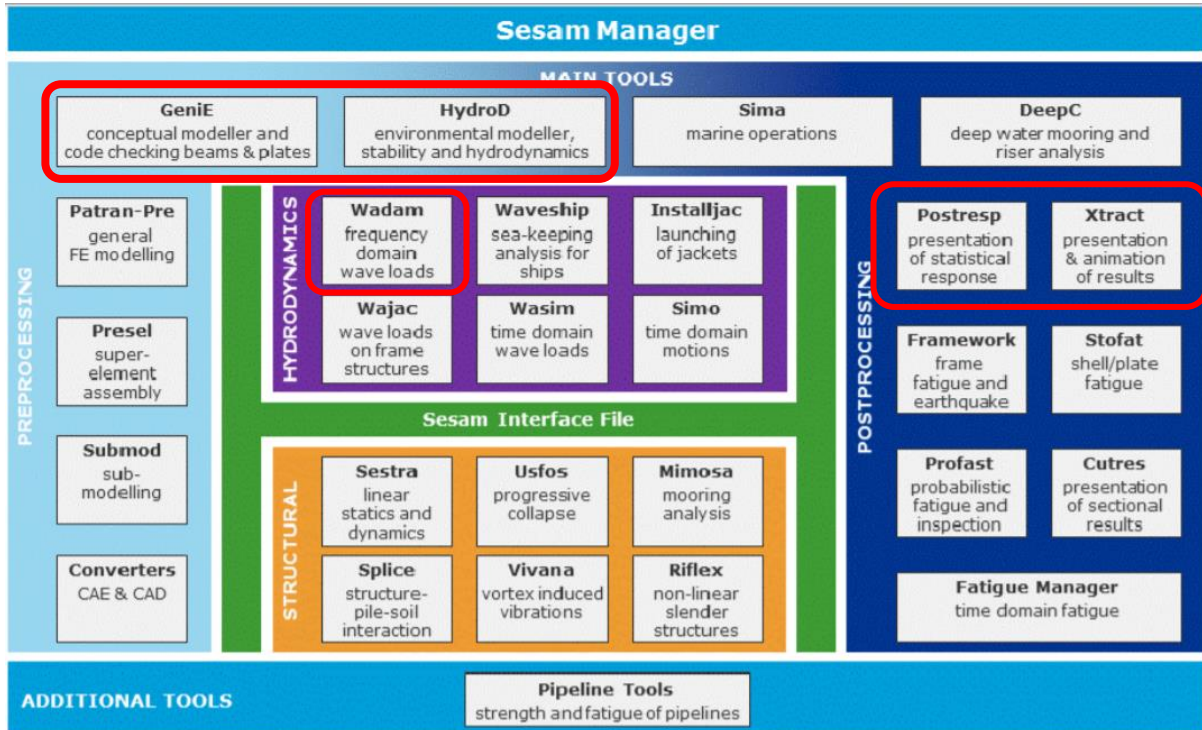
Figur 1: Modell laget i GeniE

Tabell 5: Oversikt av vekt og plassering

| Enhet            | Lettskips |       |       |       | Fullt lastet |       |       |       |
|------------------|-----------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|-------|
|                  | Vekt [kg] | X [m] | Y [m] | Z [m] | Vekt [kg]    | X [m] | Y [m] | Z [m] |
| Betong           | 1186250   |       |       |       | 1186250      |       |       |       |
| For              |           |       |       |       | 600000       | 15,2  | 8,5   | 5,3   |
| Silo             | 20300     | 15,2  | 8,5   | 5,9   | 20300        | 15,2  | 8,5   | 5,9   |
| Luftsjakter      | 1750      | 12    | 7,45  | 6,6   | 1750         | 12    | 7,45  | 6,6   |
| Stålramme silo   | 3700      | 15,2  | 8,5   | 2,65  | 3700         | 15,2  | 8,5   | 2,65  |
| Veterinærrrom    | 1200      | 5,4   | 9,15  | 6,6   | 1200         | 5,4   | 9,15  | 6,6   |
| Garderobe        | 8500      | 27,2  | 6,8   | 6,6   | 8500         | 27,2  | 6,8   | 6,6   |
| Kontor           | 10000     | 27,6  | 8,5   | 10,5  | 10000        | 27,6  | 8,5   | 10,5  |
| Ensilasje        |           |       |       |       | 100000       | 3     | 8,5   | 2,5   |
| Diesel           |           |       |       |       | 22000        | 21    | 15,5  | 1,2   |
| Vann             |           |       |       |       | 12000        | 27    | 15,5  | 1,2   |
| Aggregat         | 4000      | 10,7  | 14,5  | 1     | 4000         | 10,7  | 14,5  | 1     |
| Kompressorer     | 5000      | 11    | 1,1   | 0,9   | 5000         | 11    | 1,1   | 0,9   |
| Grå/svart-vann   |           |       |       |       | 7500         | 28,6  | 14,2  | 1     |
| <b>Totalvekt</b> | 1240700   |       |       |       | 1982200      |       |       |       |

### 3.2 Beregningsverktøy

Beregningsverktøy er helt vesentlig for å kunne løse denne problemstillingen på en god og effektiv måte. Beregningsverktøyet er valgt på grunnlag av tidligere erfaring og kjennskap til disse spesifikke programmene, som er en del av DNV GL sitt hovedprogram SESAM. Programmene som er benyttet i Sesam Manager er merket med rødt i figur 2.



Figur 2: Oversikt Sesam Manager [5]

Sesam Manager består av forskjellige underprogrammer og kommuniserer seg imellom gjennom «interface» filer. Når det skal gjennomføres en analyseoppgave som denne, der analyseobjektet skal modelleres fra tekniske tegninger i GeniE, hydrodynamiske og hydrostatiske analyser i HydroD (wadam) og statistiske analyse i Postresp, ville det vært utfordrende å holde kontroll på alle filer og arbeid som er utført. Dette er hovedoppgaven til Sesam Manager. Den holder orden på arbeidsprosessen og fungerer som et kontrollprogram [6]

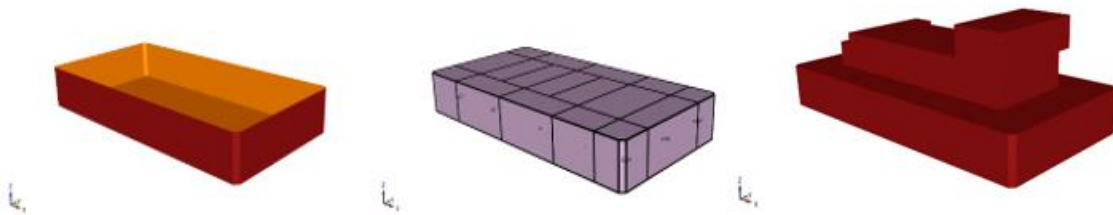
#### 3.2.1 GeniE

Skrog, overbygg og tankinndeling modelleres i GeniE. Målet med denne rapporten er hovedsakelig å analysere bevegelsene til flåten og modelleres deretter. Ved en analyse av skjærkrefter, bøyemoment og ytre krefter på flåten ville det vært nødvendig med en mer detaljert modell. Om det foreligger CAD tegninger (Computer-Aided Design - CAD) kan disse importeres direkte inn i GeniE og en enda større og mer nøyaktig analyse ville kunne blitt gjennomført. For denne rapporten er dette ikke nødvendig. CAD er et dataprogram brukt av blant annet ingeniører for å produsere tegninger og dokumentasjon i 2D. Etter at modelleringen er utført angis det en våt overflate på den delen som senere kalles

panelmodellen. Denne våte overflaten defineres slik at Wadam kan identifisere og analysere hvilke lokale krefter og spenninger som virker på skroget. Ved å dele skroget inn i flere deler, vil GeniE identifisere disse og generere tanker som kan brukes til ballastering. Til slutt kjører GeniE en FE *mesh* og en analyse av modellen, resultatet eksporteres som en panelmodell for krefter og spenninger som benyttes i den hydrodynamiske analysen og en strukturmodell for masse og treghetsradianer mm.

### 3.2.2 HydroD

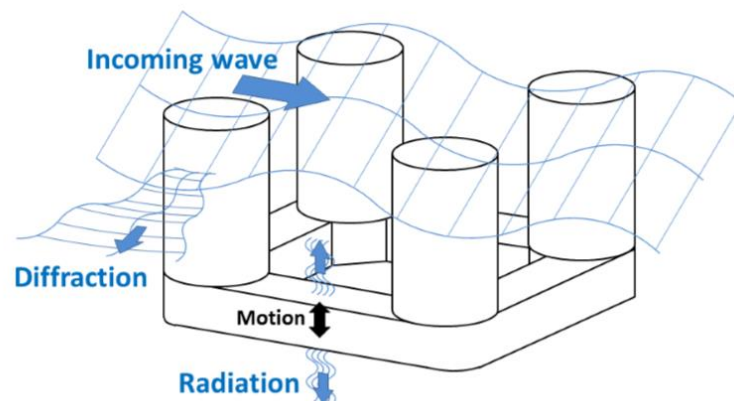
I HydroD modelleres miljøet hvor strukturen skal plasseres og analyseres. I HydroD lages arbeidsflyten for gjennomføringen av wadam analysen. Noen av funksjonene HydroD tilbyr er stabilitetsanalyse som hydrostatisk ballastering, stabilitetsanalyse, maximum KG analyse og styrke analyse. I tillegg kan man gjennomføre hydrodynamiske analyser som frekvensdominert analyse for faste og flytende legemer (wadam) og deterministiske analyse av flytende eller faste legemer (wadam) [4].



Figur 3: Panelmodell, tankinndeling og strukturmodell importert fra GeniE

#### Wadam

Wadam er et analyseprogram for beregninger av samhandlingen mellom bølge og struktur for faste og flytende konstruksjoner. Wadam utfører hydrodynamisk analyse i frekvensdomenet. Programmet er basert på prinsippet diffraksjon og radiasjon for storvolum konstruksjoner. Diffraksjon er når innkommende bølge brytes av strukturen og radiasjon er bølger som oppstår som følge av bevegelsene til konstruksjonen se figur 4 [7]. Wadam benytter den inputen som legges inn i HydroD til hydrodynamisk analyse.



Figur 4: diffraksjon og stråling [7]

### *RAO*

En RAO eller en transferfunksjon beskriver responsen i en struktur i regulære sinus bølger over et intervall av frekvenser. Amplituden (høyden) til responsen er normalisert med amplituden til bølgen. RAO kan kombineres for å beskrive andre responser. Transferfunksjonen til en generell bevegelse i de seks frihetsgradene, kan kombineres for å beskrive bevegelse i x, y og z retning i valgfrie punkter på konstruksjonen [8].

RAO er et resultat fra Wadam basert på bevegelsesligningen og potensialteori. Denne kan også beskrives som bevegelseskaraktistikken til en flytende konstruksjon, og beskriver bevegelsene til konstruksjonen i alle 6 frihetsgrader i form av amplitude som funksjon av bølgefrequens (bølgeperiode). RAO kan grafisk fremstilles i Postresp i form av krefter, translasjoner eller rotasjoner som en funksjon av bølgefrequens (eller bølgeperiode). For å kunne beregne responsen i en konstruksjon er RAO eller  $H(\omega)$  som den omtales senere i formel 3.5 nødvendig. I resultatdelen vil en grafisk fremstilling av RAO for de to valgte lasttilstandene legges frem og kommenteres.

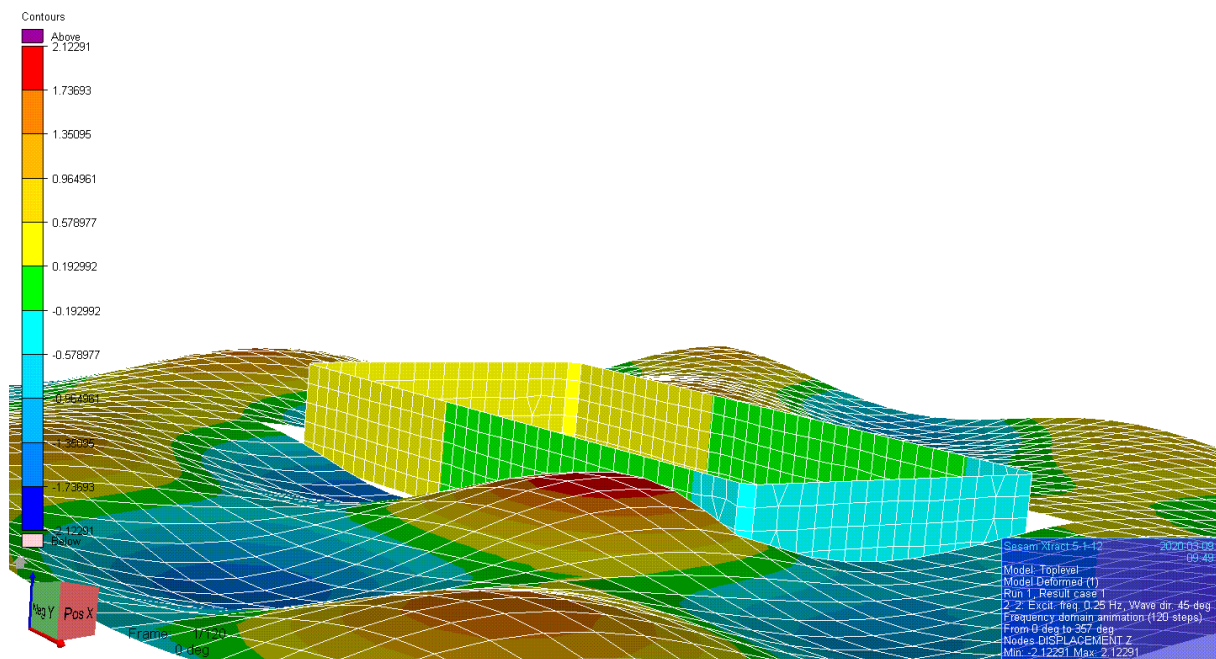
#### 3.2.3 Postresp

Den statistiske postprosessering i Postresp består av statistiske analyser av transferfunksjoner, inkludert beregninger av responsspekter og korttids og langtidsstatistikk. I Postresp er det også mulig å beregne bevegelsesligningen fra global matrise og spenningskrefter overført fra WADAM (HydroD). I Postresp kan transferfunksjoner, bølgespekter og responsspekter fremstilles grafisk. Et av spørsmålene som ønskes svar på er for hvilken sjøtilstand som er mest ugunstig med tanke på vann over dekk. Dette gjøres ved å se på den relative bevegelsen mellom spesifikke punkt på flåten og punkt som følger overflatehevingen..



### 3.2.4 Xtract

Xtract er i likhet med Postresp et postprosesserings verktøy. Resultatene fra HydroD kan videreføres inn i Xtract hvor man kan se animasjon av strukturens bevegelser i ulike bølgefrequenser. Det er også mulig å se hvor og hvor store påkjenninger konstruksjonen påføres fra bølgekreftene. Xtract er i denne rapporten benyttet for å identifisere hvilke punkter på SalMar som er mest utsatt for vann over dekk og hvilken frekvens (bølgeperiode) disse oppstår. Xtract viser resultatene i form av animasjon og er et godt verktøy for å få en mer forståelig oversikt over resultatene. I *figur 4* er det vist en slik fremstilling av resultatet. Her kan man se hvordan bølgene bygger seg opp rundt flåten som følge av diffraksjon mellom bølge og konstruksjon.



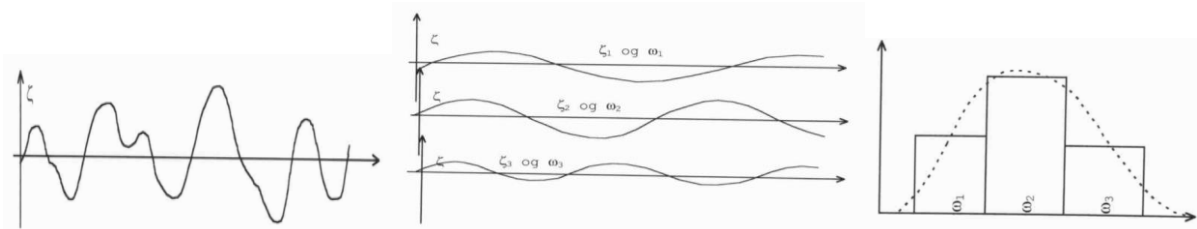
*Figur 5: Flåteanalyse i Xtract*

Størrelsene på hevingen til konstruksjonen og vannoverflaten i z-retning uttrykkes med ulike konturer (farger) og skalaen kan ses til venstre i *figur 4*. Nede i høyre hjørne finner man en informasjonsboks hvor det vises hvilken frekvens og retning bølgene har i dette øyeblikket.

### Bølgespekter

En irregulær sjøtilstand er sammensatt av ulike individuelle regulære bølger. Hver regulær bølge har sin unike bølgefrequens, fasehastighet, bølgeperiode og bølgeamplitude. Summen av de regulære bølgene danner til sammen en irregulær sjøtilstand. Energien i hver komponentbølge:

$$E_n = \frac{1}{2} \rho g \zeta_{an}^2 \quad [3.1]$$



Figur 6: Irregulære bølger[10]    Figur 7: Irregulær sjøtilstand delt opp i regulære bølger[10]    Figur 8: Energifordeling i bølgen[10]

Fra en irregulær sjøtilstand, som vist i *Figur 3*, kan man splitte den opp i ulike regulære komponentbølger [*Figur 4*]. Energien i hver komponentbølge kan illustreres i et bølgespekter som viser energifordelingen i sjøtilstanden, illustrert i *Figur 5*.

Her har man et endelig antall komponentbølger. Ved å øke  $n$  (antall komponentbølger) vil  $\delta\omega$  bli mindre, som vil si at energien i hvert frekvens-band vil bli mindre. Fra dette kan man danne et nytt uttrykk:

$$S(\omega_n) = \frac{E_n}{\rho g \delta\omega} = \frac{0.5 \rho g \zeta_{an}^2}{\rho g \delta\omega} \quad [3.2]$$

Ved et stort nok antall stolper vil histogrammet til slutt bli en kontinuerlig funksjon. Slik er et bølgespekter bygget opp og det viser hvordan bølgeenergien varierer som en funksjon av bølgefrequensen.

Den totale energien er proporsjonal med arealet under grafen og blir som følger:

$$E = \sum E_n = \rho g \sum S(\omega_n) \delta\omega \quad [3.3]$$

Fra satellitter, værstasjoner og plattformer har en gruppe forskere gjennom observasjoner kommet frem til et knippe standard bølgespekter. Fra NS9415 skal denne rapporten vurdere bevegelsene i konstruksjonen ved bruk av et JONSWAP bølgespekter. I DNVGL-CG-0130 står det at ved en design-analyse skal det brukes gitte parametere.

Standard JONSWAP bølgespekter med parametere:

$$\gamma = 3,3$$

$$\sigma_a = 0,07 \text{ for } \omega < \omega_p$$

$$\sigma_b = 0,09 \text{ for } \omega > \omega_p$$

Fra RP-DNVGL-C205 [9] forventes JONSWAP spekteret å gi en fornuftig modell etter følgende formel:

$$3,6 \leq \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \leq 5 \quad [3.4]$$

### Responsspekter

Et responsspekter ( $R(\omega)$ ) er produktet mellom bølgespekter ( $S(\omega)$ ) og RAO ( $H(\omega)$ ). En irregulær sjø kan som tidligere vist beskrives som sjø med varierende bølgehøyde og periode (frekvens), bygget opp av ulike regulære bølgekomponeenter. Ved å plassere en konstruksjon i irregulær sjø vil responsen og reaksjonen i konstruksjonen også være irregulær. Disse responsene kan være krefter, momenter, spenninger og translasjoner og rotasjoner. Et responsspekter kan derfor forklares på samme måte som et bølgespekter. For å danne et responsspekter trenger man en overføringsfunksjon (RAO) og et bølgespekter [10].

$$R(\omega) = S(\omega) \cdot H(\omega)^2 \quad [3.5]$$

Det dannes et responsspekter for hver RAO, bølgeretning og hvert bølgespekter. Spekteret brukes deretter videre i korttidsstatistikk kombinert med en sannsynlighet for overskridelse sannsynlighet på 63% og en varighet på sjøtilstanden på tre timer. Resultatet er den mest sannsynlig største responsen konstruksjonen kan oppleve i løpet av en sjøtilstand som antas å holde seg konstant i tre timer [8].

### Korttidsstatistikk

Korttidsstatistikk benyttes for å estimere den statistiske responsen påført av en stasjonær sjøtilstand som er definert i et bølgespekter. I denne rapporten blir det benyttet sjøtilstander med tre timers varighet og en sannsynlighet for overskridelse av maks respons og maks bølge på 63%. I pensum kompendiet til J.H. Jorde, irregulær sjø finner man en mer detaljert utledning av verdier som overskridelses sannsynlighet, signifikant bølgehøyde og maksimal bølgehøyde. Det er inkludert en forenklet utledning i denne rapporten for å kunne beregne nevnte verdier.

Gjennom tidene er det blitt benyttet ulike metoder for å hente inn verdifull informasjon om vind, bølgehøyde og bølgelengde. Disse metodene er permanente vær skip, bølgebøyer samt observasjoner fra seilende skip [10]. På seilende skip dokumenteres endringene i været i en dekkdagbok. Informasjonen som noteres er blant annet vind, bølger og sikt. Basert på disse målingene/observasjonene har det vist seg at en sjøtilstand kan beskrives ved hjelp av et bølgespekter. Sannsynligheten for en enkelt bølgehøyde kan beskrives som Rayleighfordelt:

$$f(x) = \frac{x}{m_0} e^{-\frac{x^2}{2m_0}} \quad [3.6]$$

Når man vil benytte bølgehøyde ( $H$ ) istedenfor bølgeamplitude ( $x$ ) må sannsynligheten for at en bestemt bølgehøyde skal inntreffe være like stor som sannsynligheten for at en tilsvarende bølgeamplitude skal inntreffe. Ved å sette inn for  $H$  og litt rydding i formel [3.6] får vi følgende uttrykk:

$$f(H) = \frac{H}{4m_0} e^{-\frac{H^2}{8m_0}} \quad [3.7]$$

Ved å benytte formel [3.7] kan signifikant bølgehøyde beregnes som vist i formel [3.8].

$$H_{1/3} = 4\sqrt{m_0} \quad [3.8]$$

Når signifikant bølgehøyde,  $T_z$  og varigheten til sjøtilstanden (3 timer) er kjent kan sannsynligheten for at en bølgehøyde er større eller mindre enn  $H_{maks}$  beregnes.

$$P(H_{ekstrem} > H_{maks}) = 1 - G(H_{maks}) \quad [3.9]$$

$$G(H_{maks}) = (1 - e^{-2(\frac{H_{maks}}{H_s})^2})^N \quad [3.10]$$

$$H_{maks} = H_s \sqrt{0,5 \ln(N)} \quad [3.11]$$

Hvor  $N$  er antall bølger og kan beregnes ved bruk av formel 4.13.

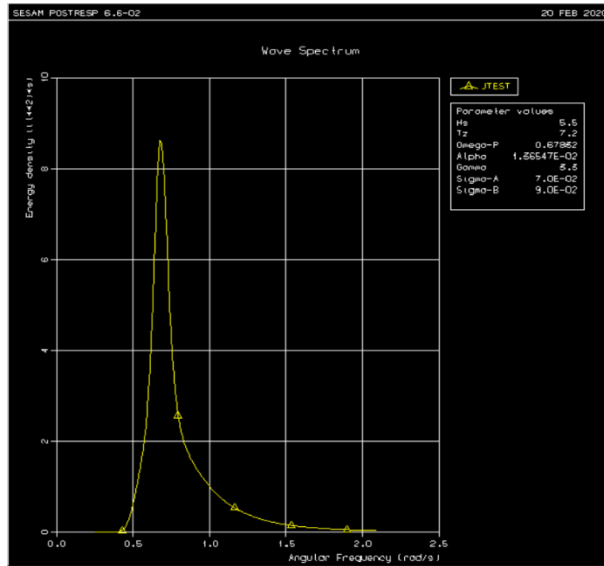
$$N = \frac{\text{varighet på sjøtilstanden}}{\text{nullkryssningsperiode}} = \frac{t}{T_z} = \frac{10800 [s]}{T_z [s]} \quad [3.12]$$

I kapittel 3.3 vil bestemmelsen av hvilke lokasjoner (sjøtilstander) som skal benyttes bli forklart, og sannsynligheten for at en respons eller bølgen vil overstige  $H_{maks}$  i løpet av tre timer er 63%. Resultatet man får ut i tabellform fra Postresp kan undersøkes ved følgende fremgangsmåte:

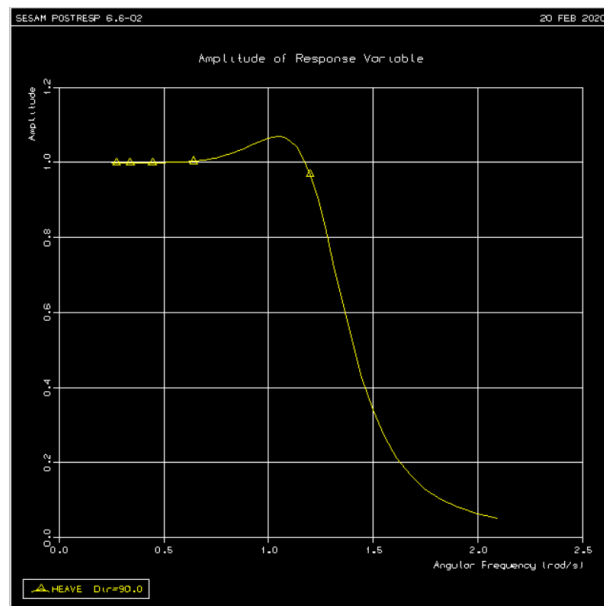
- «Short term extreme value from linear response»
  - JONSWAP bølgespekter [figur 9]
  - RAO SalMar fôrflåte [figur 10]
  - Responsspekter [figur 11]
- Arealet under responspekter
  - $m_0 = 1,8447$
- Standardavvik
  - $\sigma^2 = m_0 \rightarrow \sigma = \sqrt{1,8447} = 1,358 [m]$
- Signifikant respons amplitude
  - Gjennomsnittsverdien til de høyeste en tredjedel av amplitudene

- $n_{1/3} = 2\sqrt{m_0} = 2\sqrt{1,8447} = 2,716 [m]$
- Gjennomsnittlig bølgeperiode:
  - $T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{m_0}{m_1}} = 2\pi \sqrt{\frac{1,8447}{1,4071}} = 7,19 [s]$
- Nullkryssningsperiode:
  - $T_z = 2\pi \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} = 2\pi \sqrt{\frac{1,8447}{1,1258}} = 8,043 [s]$
- Forventet ekstremverdi for smalbandet lineær prosess (godt estimat)
  - $n_{max} = \sigma \sqrt{2 \ln \frac{T_d}{T_z}} = 1,358 \sqrt{2 \ln \frac{10800}{8,043}} = 5,154 [m]$
  - Sannsynligheten for at denne verdien overskrides er 63%
  - Derimot er sannsynligheten for en stor overskridelse veldig liten
- Fra «print short term statistics» i Postresp:
  - $n_{max} = 5,157 [m]$

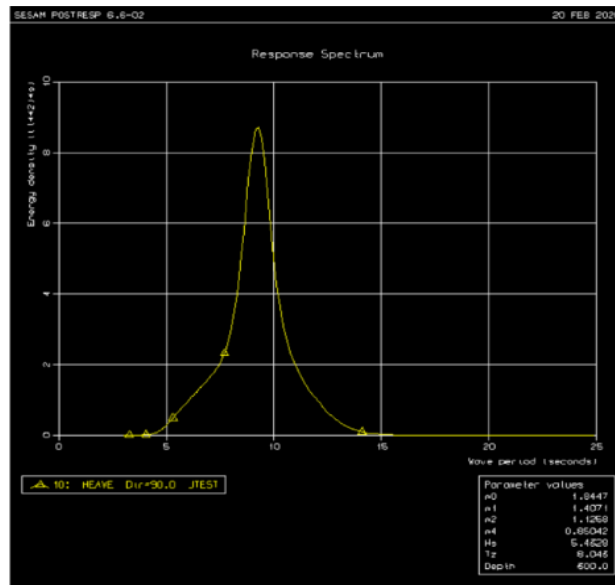
Ved å benytte denne fremgangsmåten kan vi finne signifikant respons, maksimal respons og gjennomsnittlig bølgeperiode for de kombinerte RAO som vi genererer i Postresp. Disse verdiene gis direkte fra Postresp ved «print short term statistics» ved å legge inn varigheten til sjøtilstanden (tre timer) og overskridelsessannsynligheten (0,63). Her er det benyttet globale RAO, altså responsene i tyngdepunktet til strukturen. Videre i rapporten skal resultater fra ulike punkter på flåten vurderes. RAO, bølgespekter og responspekter som er benyttet til denne utregningen er vist i *figur 9*, *figur 10* og *figur 11* nedenfor.



Figur 9: Eksempel JONSWAP bølgespekter



Figur 10: Eksempel RAO hiv



Figur 11: Eksempel responsspekter

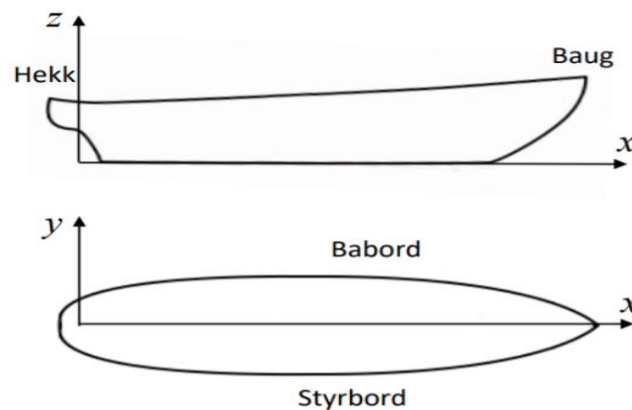
### Root mean square

Root mean square (videre omtalt som RMS) er et slags gjennomsnitt som ofte benyttes i statistikk og prosjektering. For å kunne vurdere Jørgen R. Krokstad og NORDFORSK sine verdier for tungt manuelt arbeid skal resultatet for akselerasjon og *rull* uttrykkes som RMS.

$$RMS = \sqrt{\sum_{i=0}^n x_n^2} = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2} \quad [3.13]$$

### Koordinatsystem, translasjoner og rotasjoner

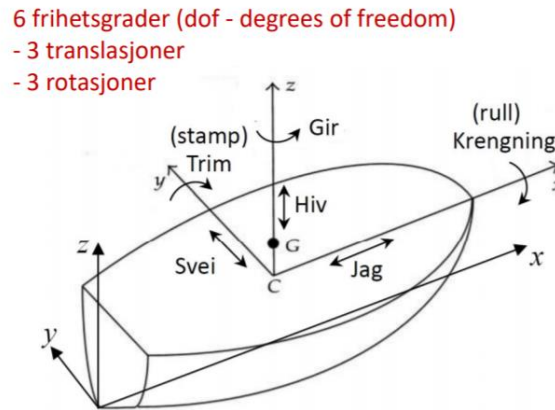
For å kunne forstå bevegelsene til en flytende innretning er det viktig å definere viktige begrep om hvilke frihetsgrader den har i forhold til et gitt koordinatsystem. Som vist i *figur 6* blir koordinatene til et skip definert ved å la x-aksen gå fra senter hekk mot senter baug, y-aksen går på tvers av båten (styrbord mot babord) og z-aksen går i vertikal retning fra laveste punkt på skipet.



Figur 12: Koordinatsystem til et vilkårlig skip [13]

Ved å ta utgangspunkt i et slikt koordinatsystem, kan det defineres frihetsgrader. Frihetsgrader er hvordan et legeme kan forflyttes og orienteres i rommet [14]. I GeniE blir koordinatsystemet ved å ha  $X=0$  i hekk,  $Y=0$  midt mellom styrbord og babord og  $Z=0$  på nederste punkt på flåten. Dette koordinatsystemet overføres videre til HydroD, men her vil  $Z=0$  være ved vannoverflaten og ikke på nederste punkt som i GeniE.

For en flytende innretning finnes det seks frihetsgrader der tre er translasjoner og tre er rotasjoner [13]. På *Figur 13* illustreres disse frihetsgradene med tilhørende koordinatsystem.



*Figur 13: Illustrasjon av et skips frihetsgrader[13]*

#### Translasjoner

- *Jag* – Bevegelse i lengderetningen ( $x$ ) som vist på figuren. *Jag* vil oppstå i størst grad ved bølger som kommer i front eller fra akter. Engelsk: *Surge*.
- *Svei* – Størst utslag for denne bevegelsen kommer fra bølger rett inn fra siden. Engelsk: *Sway*
- *Hiv* – Vertikal bevegelse. Dette er bevegelsen til innretningen i  $z$ -retning og det kan variere hvilken bølgeretning som gir det største utslaget på *hiv*. Dette er avhengig av sjøtilstand, lastetilstand og innretningens geometri. Engelsk: *Heave*.

#### Rotasjoner

- *Rull* – Krengingen til fartøyet. Dette er en rotasjon om  $x$ -aksen som kommer av bølger inn fra siden eller ved lasting/ballastering på styrbord eller babord side. Engelsk: *Roll*
- *Stamp/trim* - Rotasjon om  $y$ -aksen som oftest kommer av bølger forfra. Engelsk: *Pitch*
- *Gir* – Rotasjon om  $z$ -aksen. Ikke en gunstig rotasjon, og thrustere eller forankring nyttes til å hindre dette. Engelsk: *Yaw*.

Det er responsen for de respektive frihetsgradene som blir presentert i Postresp. Det er nyttig å merke seg de engelske navnene på frihetsgradene da det er slik de blir beskrevet i grafene som blir plottet fra Postresp.

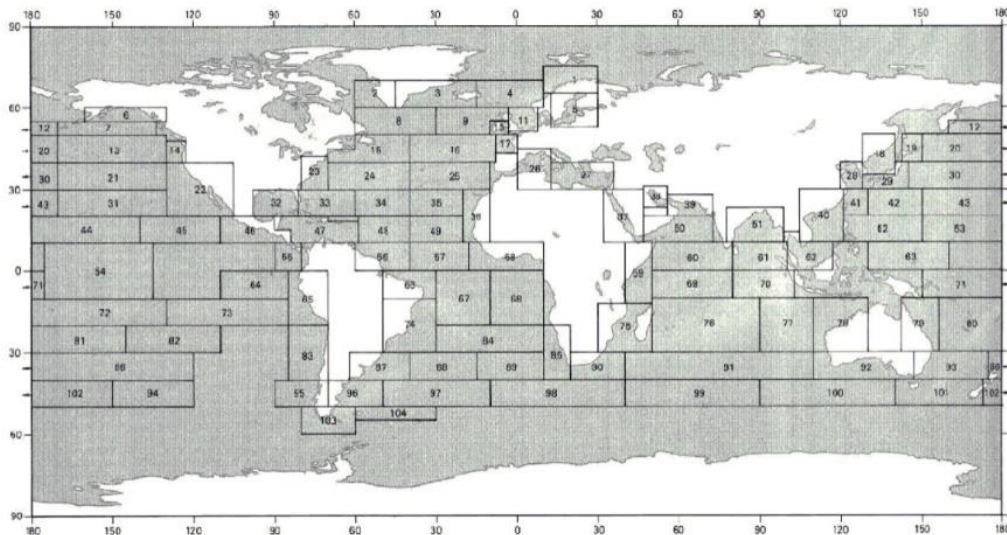


### 3.3 Lokasjon

Bedriften Endûr sjøsterk har som ønske å se hvordan deres flåter som er sertifisert for en signifikant bølgehøyde på 5.5 [m] vil respondere slike sjøtilstander. For å sette ut et anlegg skal en lokalitetsundersøkelse gjennomføres, men når man ser på en generell lokasjon og ikke har oppgitt hvilke  $T_z$  verdier som er reelle, er den beste måten å bruke statistiske data for å finne den mest sannsynlige bølgeperioden for tiltenkt signifikant bølgehøyde.

#### 3.3.1 Valg av nullkryssningsperiode ( $T_z$ )

Flåten skal analyseres med hensyn til en signifikant bølgehøyde på 5.5 [m], 3.5 [m] og 1 [m]. En signifikant bølgehøyde på 5.5 [m] vil med svært liten sannsynlighet kunne oppstå inne i fjorder, hvor flåtene er skjermet for vær og vind som kommer inn fra havet. Flytter vi oss ut av fjordene og på mer åpent hav vil derimot denne bølgehøyden kunne oppstå. Det har derfor vært nødvendig å finne et intervall med  $T_z$  verdier som er sannsynlige for dette området. Havene i verden kan deles inn i 104 nautiske soner [15]. Av disse nautiske sonene dekker sone 1, 4 og 11 våre kystområder, vist i *Figur 14*. Disse nautiske sonene går under scatter diagrammet «world wide».



*Figur 14: Nautiske soner*

Et scatter diagram definerer sannsynligheten for ulike sjøtilstander som kan oppstå som vist i *Figur 15*. Hver sjøtilstand er definert av signifikant bølgehøyde,  $H_s$  [m], og nullkryssningsperiode,  $T_z$  [s]. For å beregne det mest sannsynlige  $T_z$ -intervallet benyttes antall observasjoner hvor to hendelser oppstår samtidig.

| Tz(s)  | 3.5 | 4.5  | 5.5   | 6.5   | 7.5   | 8.5   | 9.5   | 10.5 | 11.5 | 12.5 | 13.5 | 14.5 | 15.5 | 16.5 | 17.5 | Sum    |
|--------|-----|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|
| Hs (m) |     |      |       |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |        |
| 1.0    | 311 | 2734 | 6402  | 7132  | 5071  | 2711  | 1202  | 470  | 169  | 57   | 19   | 6    | 2    | 1    | 0    | 26287  |
| 2.0    | 20  | 764  | 4453  | 8841  | 9045  | 6020  | 3000  | 1225 | 435  | 140  | 42   | 12   | 3    | 1    | 0    | 34001  |
| 3.0    | 0   | 57   | 902   | 3474  | 5549  | 4973  | 3004  | 1377 | 518  | 169  | 50   | 14   | 4    | 1    | 0    | 20092  |
| 4.0    | 0   | 4    | 150   | 1007  | 2401  | 2881  | 2156  | 1154 | 485  | 171  | 53   | 15   | 4    | 1    | 0    | 10482  |
| 5.0    | 0   | 0    | 25    | 258   | 859   | 1338  | 1230  | 776  | 372  | 146  | 49   | 15   | 4    | 1    | 0    | 2073   |
| 6.0    | 0   | 0    | 4     | 63    | 277   | 540   | 597   | 440  | 240  | 105  | 39   | 13   | 4    | 1    | 0    | 2323   |
| 7.0    | 0   | 0    | 1     | 15    | 84    | 198   | 258   | 219  | 136  | 66   | 27   | 10   | 3    | 1    | 0    | 1018   |
| 8.0    | 0   | 0    | 0     | 4     | 25    | 69    | 103   | 99   | 69   | 37   | 17   | 6    | 2    | 1    | 0    | 432    |
| 9.0    | 0   | 0    | 0     | 1     | 7     | 23    | 39    | 42   | 32   | 19   | 9    | 4    | 1    | 1    | 0    | 178    |
| 10.0   | 0   | 0    | 0     | 0     | 2     | 7     | 14    | 16   | 14   | 9    | 5    | 2    | 1    | 0    | 0    | 70     |
| 11.0   | 0   | 0    | 0     | 0     | 1     | 2     | 5     | 6    | 6    | 4    | 2    | 1    | 1    | 0    | 0    | 28     |
| 12.0   | 0   | 0    | 0     | 0     | 0     | 1     | 2     | 2    | 2    | 2    | 1    | 1    | 0    | 0    | 0    | 11     |
| 13.0   | 0   | 0    | 0     | 0     | 0     | 0     | 1     | 1    | 1    | 1    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 4      |
| 14.0   | 0   | 0    | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0    | 1    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 1      |
| Sum    | 331 | 3559 | 11937 | 20795 | 23321 | 18763 | 11611 | 5827 | 2489 | 926  | 313  | 99   | 29   | 9    | 0    | 100000 |

Figur 15: Scatter diagram [15]

1.0 Undersøker sannsynligheten for  $5 \leq H_s \leq 6$  og Tz mellom 7,5s og 11,5 s

- Hendelse A:  $5 \leq H_s \leq 6$  [m]
- Hendelse B:  $7,5 \leq T_z \leq 11,5$

- $P(B|A) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)}$
- $A \cap B$  er antall observasjoner med sjøtilstanden hendelse A og B samtidig.
  - 6660 observasjoner
- A er totalt antall observasjoner av  $5 \leq H_s \leq 6$ 
  - 7396

$$P(B \cap A) = \frac{\text{gunstige utfall}}{\text{mulige utfall}} = \frac{6660}{100000} = 0,066$$

$$P(A) = \frac{\text{gunstige utfall}}{\text{mulige utfall}} = \frac{7396}{100000} = 0,07396$$

$$P(B|A) = \frac{0,066}{0,07396} = 0.9005 \approx 90\%$$

På samme måte beregner vi sannsynligheten for at:

$$5 \leq H_s \leq 6 \text{ og } T_z < 7,5[s]$$

$$P(T_z < 7,5 | 5 \leq H_s \leq 6) = 0.047 \approx 4.7\%$$

Og at Tz er høyere enn 11.5:

$$H_s = 5 \leq H_s \leq 6 \text{ og } T > 7,5[s]$$

$$P(T_z > 7,5 | 5 \leq H_s \leq 6) = 0.05097 \approx 5.1\%$$

Samme fremgangsmåte er benyttet for å finne intervallet tilhørende  $H_s = [3.5 \text{ m}]$ .

Sannsynligheten for at Tz intervallet ligger mellom 5.5 og 9.5 [s] gitt en signifikant bølgehøyde på 3.5 [m] er 86,6 prosent. Sannsynligheten for at Tz er lavere eller høyere gitt denne Hs er henholdsvis 0.2 prosent og 13.1 prosent.

Sannsynligheten for at Tz intervallet ligger mellom 7.5 og 11.5 [s] gitt en signifikant bølgehøyde på 5.5 [m] er beregnet til 90 prosent. Sannsynligheten for at Tz er lavere eller høyere gitt denne Hs er respektive 4.7 prosent og 5.1 prosent.

På bakgrunn av disse beregningene er det blitt valgt tre lokasjoner med tre ulike signifikante bølgehøyder. Lokasjon 1 består av 9 sjøtilstander, lokasjon 2 består av 14 sjøtilstander og tilstand 3 består også av 14 sjøtilstander som er presentert i *Tabell 6*.

*Tabell 6: Oversikt over de tre ulike lokasjonene og tilhørende sjøtilstander*

| Hs [m] | 1.0 |  | Hs [m] | 3.5 |  | Hs [m] | 5.5  |
|--------|-----|--|--------|-----|--|--------|------|
| Tz [s] |     |  | Tz [s] |     |  | Tz [s] |      |
|        | 1.6 |  |        | 5.5 |  |        | 7.5  |
|        | 1.8 |  |        | 5.8 |  |        | 7.8  |
|        | 2.0 |  |        | 6.1 |  |        | 8.1  |
|        | 2.2 |  |        | 6.4 |  |        | 8.4  |
|        | 2.4 |  |        | 6.7 |  |        | 8.7  |
|        | 2.6 |  |        | 7.0 |  |        | 9.0  |
|        | 2.8 |  |        | 7.3 |  |        | 9.3  |
|        | 3.1 |  |        | 7.6 |  |        | 9.6  |
|        | 3.4 |  |        | 7.9 |  |        | 9.9  |
|        |     |  |        | 8.2 |  |        | 10.2 |
|        |     |  |        | 8.5 |  |        | 10.5 |
|        |     |  |        | 8.8 |  |        | 10.8 |
|        |     |  |        | 9.1 |  |        | 11.1 |
|        |     |  |        | 9.4 |  |        | 11.4 |

Den første lokasjonen er valgt av den grunn at man ønsker å sammenligne verdier som er beregnet av Sintef i rapporten «Stabilitet og sikkerhet for havbruksflåter i sjøgang». Ved å sammenligne bevegelsene som legges frem i rapporten opp mot bevegelsene i flåten som er modellert, vil man kunne verifisere at de verdiene som er beregnet for SalMar er pålitelige. Benyttet flåte i Sintef rapport har tilnærmet lik hoveddimensjoner som SalMar, men har dog en lavere egenvekt. Lokasjonen går inn under bølgeklasse B og Tz-intervallet er hentet fra NS9415. Denne sjøtilstanden brukes kun i forbindelse med sammenligningen av flåtene.

Lokasjon 2 med en signifikant bølgehøyde på 3.5 [m] er valgt på bakgrunn av samtale med ansatt i SalMar AS som arbeider på modellert flåte. Flåten er plassert (lokasjon) der den mest sannsynlig høyeste signifikante bølgehøyden er på rundt 3.5 [m]. Tz intervallet er beregnet fra scatter diagram «world wide».

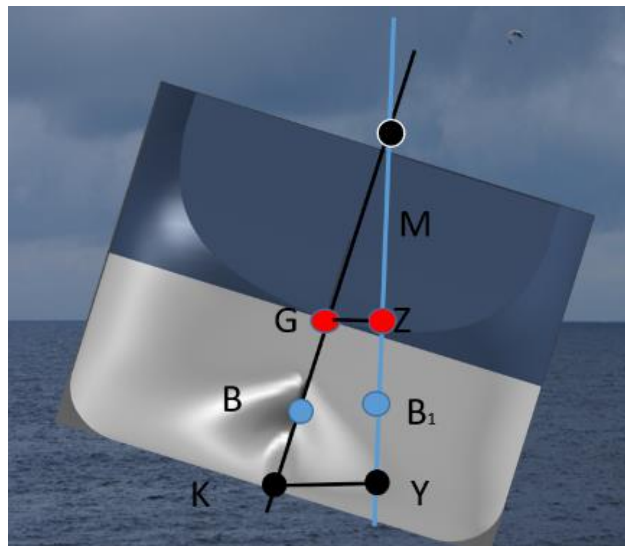
Sjøtilstanden med en signifikant bølgehøyde på 5.5 [m] er valgt etter ønske fra bedriften Endûr sjøsterk. SalMar flåten er også sertifisert for en Hs på 5.5 [m]. Tz intervallet er beregnet ut fra scatter diagram «world wide» der sannsynligheten for at Tz ligger innenfor dette intervallet gitt en signifikant bølgehøyde mellom 5 og 6 [m] er funnet til 90 prosent.

### 3.4 Hydrostatikk og stabilitet

Hydrostatisk data og stabilitet er en viktig del av denne rapporten. Dette er på grunn av de strenge kravene om flåtens evne til å holde seg stabil. Dette delkapittelet tar for seg teorien som gir grunnlag for stabiliteten til en flytende innretning.

#### 3.4.1 Oppdrift, metasenter og tyngdepunkt

Det viktigste kravet for å kunne bygge en forflåte er stabilitet. Stabilitet er en flytende innretnings evne til å motstå kantring, og en innretnings stabilitet er blant annet avhengig av geometri, vekt og deplasement av væske [16]. I *Figur 16* vises det en illustrasjon av viktige punkt som bestemmer innretnings evne til å opprettholde stabilitet.



*Figur 16: Tversskipsstabilitet [17]*

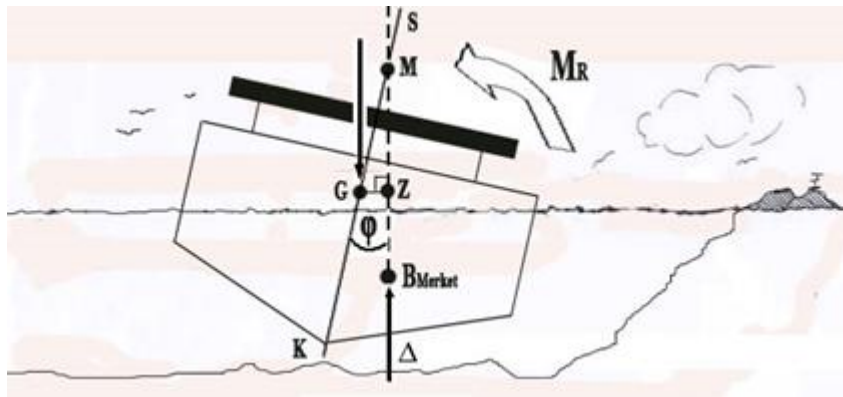
Avstanden fra de ulike punktene som for eksempel B til M blir skrevet som  $\overline{BM}$ . Avstandene  $\overline{KB}$  og  $\overline{BM}$  er avhengig av geometrien til innretningen. B er oppdriftssenter, som ligger i senter av det neddykkede volumet. Oppdriften er den kraften som gjør at et legeme kan holde seg flytende, da trykk vil presse på det fortrengte volumet oppover i vertikal retning. Uten krenkning vil oppdriftssenteret og tyngdepunktet ligge ovenfor hverandre uten horisontal avstand. Ved krenkning som vist på *Figur 16* vil oppdriftssenteret flytte seg fordi det neddykkede volumet flyttes, og skape en avstand fra det tidligere oppdriftssenteret og tyngdesenteret [13].

Metasenteret, beskrevet med M, er et tenkt punkt i en innretnings midtplan som oppdriftskraften virker gjennom når fartøyet krenger på stille vann» [18]. Dette punktet er viktig for å kunne holde på stabiliteten til et fartøy. Metasenteret ved krenkning kan lokaliseres med å trekke en loddrett linje fra oppdriftssenteret. Loddlinjen gjennom G har ved krenkning fulgt skipets koordinatsystem, og har derfor

fått en vinkel tilsvarende krenningsvinkelen som vist i *Figur 16*. Der disse to linjene krysser finner man metasenteret. Den vertikale avstanden mellom G og M må være positiv for å unngå kantring, og denne avstanden kalles  $\overline{GM}$  [17]. Myndighetene stiller krav til at  $\overline{GM}$  skal være 0.15 [m] som minimum [19].

### 3.4.2 Rettende moment

En innretning vil begynne å krenge ved at det oppstår et krenagemoment. Et moment er som kjent en kraft med en arm. Uten en motkraft vil dette momentet klare å krenge skipet helt rundt, til det til slutt ligger opp-ned. Momentet som hjelper innretningen med å rette seg opp igjen ved krenning kalles opprettende moment eller  $M_R$ [20]. I *Figur 17* illustreres dette momentet.



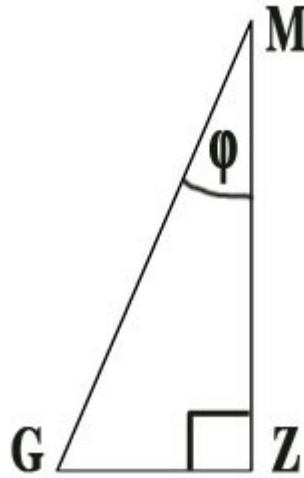
*Figur 17: Opprettende moment [19]*

Som man ser i figuren, vises det en ny plassering, “Z”. Z er den horisontale plasseringen til oppdriftssenteret vist på linje med G. Dette gjøres for å lettere illustrere den horisontale avstanden mellom tyngdesenteret (G) og oppdriftssenteret (B). Når fartøyet krenses, vil som nevnt oppdriftssenteret flytte seg og skape en avstand mellom disse. Det rettende momentet som skal rette opp igjen fartøyet kommer fra kraften fra oppdriftssenteret sammen med kraftens arm,  $\overline{GZ}$ . Disse parameterne er med på å gjøre at en innretning klarer å holde stabiliteten intakt.

Siden moment er kraft ganger arm, vil det rettende momentet blir større i takt med størrelsen på  $\overline{GZ}$ . Om denne avstanden blir veldig liten, blir det også et lite moment som ikke klarer å rette opp igjen fartøyet. Hvis denne avstanden blir negativ, altså at tyngdepunktet flytter seg over til siden som krenagemomentet virker, vil både tyngdepunktet og oppdriftssenteret bidra til et moment som virker i samme retning som krenagemomentet, og dette vil gjøre at innretningen kommer til å kante [16]. For å forhindre at slike ting skal skje, er det strenge krav til stabilitet som er gitt i NS 9415 [12]. Disse kravene er gitt for flytende forflåter og det stilles ikke samme krav som for eksempel fiskebåter eller supply-fartøy.

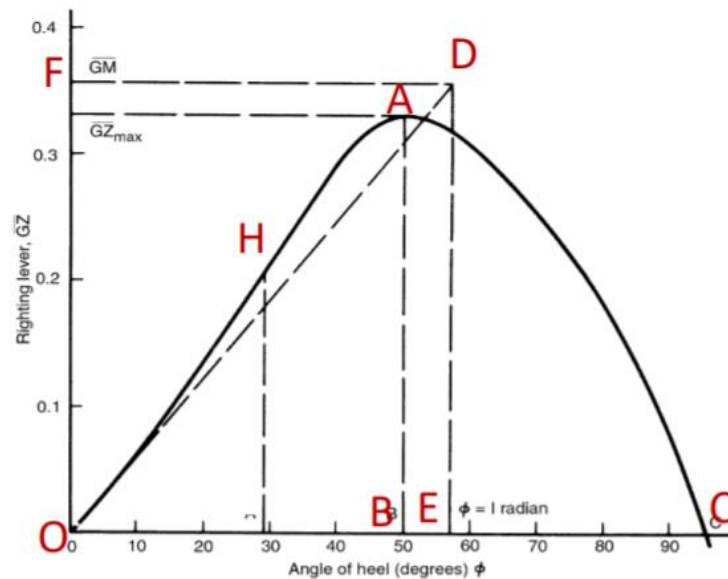
### 3.4.3 GZ-kurven

Som illustrert i *Figur 18* er avstanden GZ, altså den rettende armen avhengig av krengevinkel og avstanden GM [19]. Siden GZ varierer med to forskjellige variabler er det mulig å plote en GZ-kurve med avstand [m] som funksjon av vinkelen [grader]. Denne kurven gir et bilde på stabiliteten til et fartøy.



*Figur 18: Forholdet mellom GZ, GM og krengevinkel [19]*

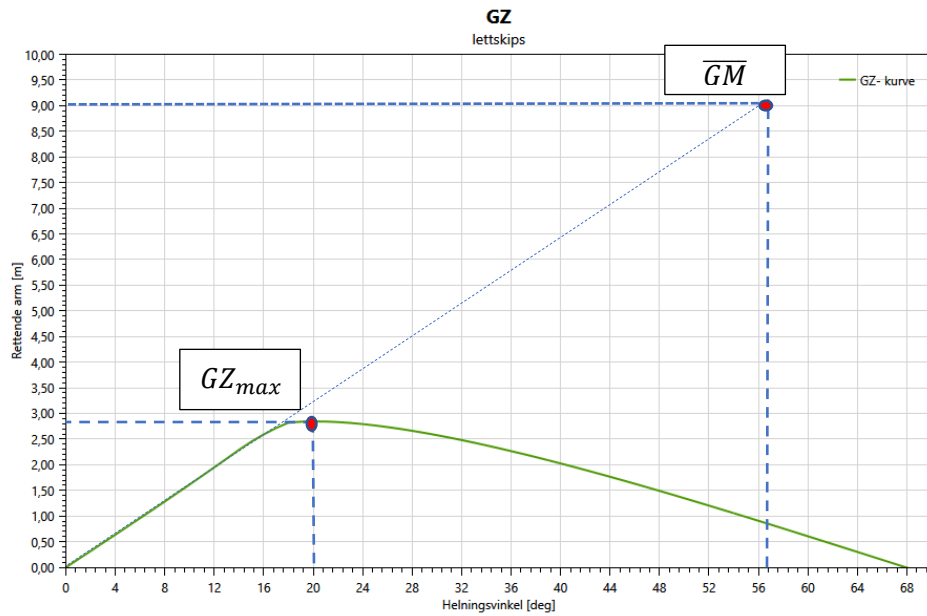
Ved å studere GZ-kurven kan det hentes ut forskjellig informasjon som kan være nyttig å vite. Informasjon som kan hentes ut er illustrert i *Figur 19*.



*Figur 19: GZ-kurve [12]*

- O-C: Stabilitetsområde. 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 fartøyet kan beholde uten å kantre.
- H: Ved dette punktet endres kurvaturen på GZ-kurven og nær denne vinkel går dekkskanten på f.eks et skip ned i vann. I fleste fall er dette lik kantringsvinkelen [13].



Figur 20: GZ-kurve lettskips intakt for SalMar flåten



### 3.4.4 Last kondisjoner

Endúr sjøsterk har kommet med informasjon om hvilke verdier SalMar har i kondisjon 1 og 2. Verdiene er beregnet av bedriften SAWICON i forbindelse med en bølgelast analyse utført på SalMar for Endúr sjøsterk [21].

Tabell 7: Lastkondisjoner SalMar

| Lastkondisjoner              | Kondisjon 1 | Kondisjon 2 |
|------------------------------|-------------|-------------|
|                              | Lettskips   | Fullastet   |
| $\Delta$ [tonn]              | 1249.7      | 1983.0      |
| $\nabla$ [ $m^3$ ]           | 1210.47     | 1934.63     |
| Dypgang $v/\frac{L_{pp}}{2}$ | 2.096       | 3.35        |
| Dypgang AP                   | 2.096       | 3.93        |
| Dypgang FP                   | 2.096       | 2.765       |
| Trim over $L_{pp}$           | 0           | -1.97       |
| Kreng vinkel (stb +)         | 0           | 0.54        |
| <b>COG</b>                   |             |             |
| xG                           | 0           | -0.91       |
| yG                           | 0           | -0.047      |
| zG                           | 3.4         | 3.88        |
| <b>Radii of gyration</b>     |             |             |
| Rx                           | 5.15        | 5.15        |
| Ry                           | 9.636       | 9.636       |
| Rz                           | 10.261      | 10.261      |

### 3.5 Hydrodynamiske beregninger

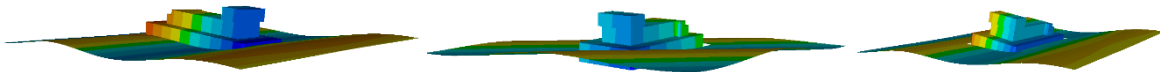
Denne delen omhandler hydrodynamiske beregninger. Her blir det vist hvordan de hydrodynamiske beregningene gjøres i henhold til gitte krav. Fremgangsmåten for disse beregningene blir også forklart i dette kapitlet.

#### 3.5.1 Bestemmelse av kritiske punkter

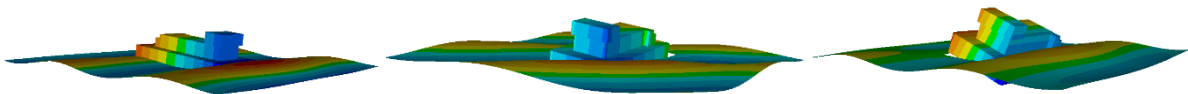
De kritiske punktene bestemmes ved å se på bevegelsene til lettskips og fullastet lastetilstand. I tilstanden lettskips er det naturlig å anta størst *rull* og rotasjoner og translasjon i *hiv*. For fullastet vil det mest sannsynlig være større fare for grønn sjø da fribordet er mindre enn for lettskips.

#### *Lettskips*

Dette er tilstanden hvor flåten har lavest vekt og størst fribord. På grunn av en lavere vekt sett i forhold til fullastet vil det være naturlig å anta at flåtens rotasjoner i denne tilstanden vil være større siden flåten ligger «lettere» i vannet. Punktene tas ut for den verst tenkelige situasjonen, det vil si når bølgefrequensen er tilnærmet lik egenperioden til flåten. Punktene som er bestemt er satt som kritiske med hensyn til analysen som er gjort i Xtract og som *figur 21* og *22* illustrerer vil bevegelsene i flåten kunne bli store når bølgefrequensen er den samme som egenfrekvensen til SalMar.



Figur 21:  $T = 5.5$  s,  $f = 0.181$  Hz, møtende sjø, skråsjø og sidesjø



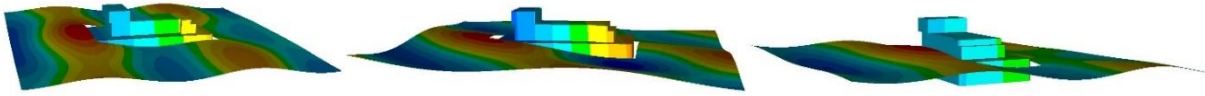
Figur 22  $T = 5.0$  s,  $f = 0.2$  Hz, møtende sjø, skråsjø og sidesjø

Tabell 8: Kommentarer lettskips kondisjon

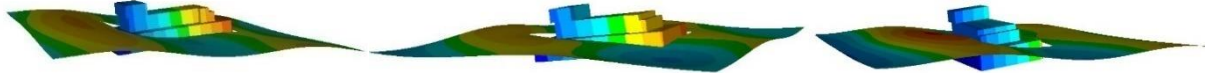
| Lastkondisjon | Bølgeretning | Frekvens  | Periode                    | Mest utsatt punkt   |
|---------------|--------------|---|----------------------------|---|
| Lettskips     | 0            | Mest utsatt for <i>hiv rull</i> og <i>stamp</i> når bølgeperioden er nær egenperioden | Egenperiode på rundt 5-6 s | Front senter, front hjørne babord, babord senter, hekk hjørne babord, hekk senter |
|               | 45           |   |                            |   |
|               | 90           |   |                            |   |

*Fullastet*

Dette er tilstanden hvor flåten har størst vekt samtidig lavest fribord. I denne tilstanden er det naturlig å anta en større kjangs for vann over dekk sett i forhold til lettskipstilstanden.



Figur 23  $f = 0.2 \text{ Hz}$ ,  $T = 5 \text{ s}$ , møtende sjø, skråsjø og sidesjø



Figur 24  $f = 0.180 \text{ Hz}$ ,  $T = 5.5 \text{ s}$ , møtende sjø, skråsjø og sidesjø

Tabell 9: Kommentarer fullastet kondisjon

| Lastkondisjon | Bølgeretning | Frekvens  | Periode         | Mest utsatt punkt   |
|---------------|--------------|---|-----------------|---|
| Fullastet     | 0            | Mest utsatt for <i>hiv</i> , <i>rull</i> og <i>stamp</i> ved frekvenser nær egenperioden. | Nær egenperiode | De kritiske punktene som er lokalisert er front senter, hjørne front babord, senter babord, hjørne hekk babord, senter hekk |
|               | 45           |   |                 |   |
|               | 90           |   |                 |   |

De mest utsatte punktene er valgt til å være front senter, front hjørne babord, babord senter, hekk hjørne babord og hekk senter. Punktene er valgt ut for å undersøke vann over dekk. For beregningene av rotasjoner er det tatt utgangspunkt i det globale nullpunktet i flåten.

### 3.5.2 Fribord

Fribordet er avstanden fra stille vann til dekk på flåten. I NS9415 er kravet for minimum fribord gitt av formel [3.1].

Tabell 10: Fribordskrav [12]

| Hs [m] | Bølgeklasse | Eksponeringsgrad    | $K_1$ [mm] | $K_2$ [mm] | Lpp [m] | $f_{min}$ [mm] |
|--------|-------------|---------------------|------------|------------|---------|----------------|
| 5,5    | E           | Svær eksponering    | 700        | 0          | 34      | 1278           |
| 3,5    | E           | Svær eksponering    | 700        | 0          | 34      | 1278           |
| 1,0    | B           | Moderat eksponering | 400        | 0          | 34      | 978            |

Minimum fribord beregnet av formel fra NS9415:  $f_{min} > 1278$  [mm]

Tabell 11: Resultat av SalMar's fribord iht krav

| Lastkondisjoner | Dekkhøyde [m] | Dypgang [m] | Fribord midskips [m] | $f_{min}$ [m] | Ihh. til krav? |
|-----------------|---------------|-------------|----------------------|---------------|----------------|
| Lettskips       | 4,8           | 2,096       | 2,704                | 1,278         | Ja             |
| Fullastet       | 4,8           | 3,35        | 1,45                 | 1,278         | Ja             |

Ifølge NS9415 vil flåten bestå minimum fribordskrav når  $f_{min}$  ikke skal overskride 1,278. Grunnet trim og krenkning i noen av lastkondisjonene vil ikke fribordskravet oppfylles om man regner med fribord i den enden med størst trim.  $K_2$  som er ekstra fribord ved kryss fortøyning er ikke aktuelt. Ifølge ScaleAQ som driver med fortøyningsanalyse, er ikke kryssfortøyning lenger vanlig praksis.  $K_2$  vil ikke medregnes i denne rapporten.

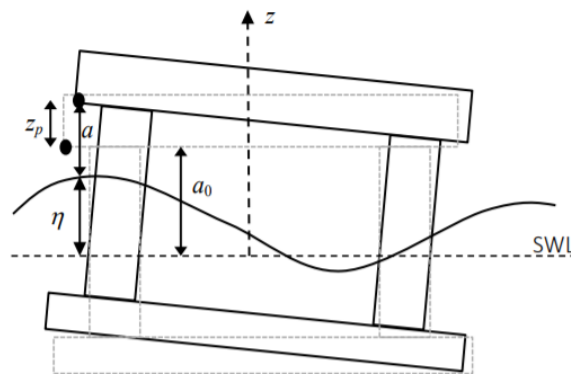
### 3.5.3 Egenperiodene til flåten

Fra Postresp kan man lese av egenperiodene til flåten i henholdsvis *hiv*, *stamp* og *rull*. En egenperiode er perioden en innretning bruker på en svingning fra et punkt, til den er tilbake på det samme punktet. Grunnen til at det er ønskelig å se på egenperioden til SalMar er at det er i denne perioden flåten er mest utsatt for resonans. Resonans er et fenomen som oppstår når en ytre kraft virker på en innretning med samme/tilnærmet lik frekvens som egenfrekvensen til innretningen [22]. Det er her den største responsen vil oppstå, og dette er naturlig nok en ugunstig situasjon.

### 3.5.4 Relative bevegelser mellom punkt på flåten og overflateheving

Den relative bevegelsen mellom flåten og overflatehevingen er viktig å analysere siden vannskyll på dekk kan føre til skade på materiell og personell. Den relative bevegelsen viser hvor mye fribord som er nødvendig for å unngå overslag av vann på dekk. Det stilles krav til minimum fribord i NS 9415 [12].

For å beregne vann over dekk er det valgt ut noen kritiske punkter gjennom analyse av konstruksjonen i Xtract. Disse punktene defineres i Postresp i funksjonen «create, specific point», og for hvert punkt dannes det individuelle RAO i funksjonen «create, responsevariable, combined motion», hvor alle bidrag til bevegelser i x, y og z- retning inkluderes. Disse punktene kombineres deretter sammen med RAO fra utvalgte punkter på vannoverflaten rundt SalMar. Punktene på vannoverflaten legges inn som «off-body-points» i HydroD og identifiseres som  $ELEV_n$  i Postresp. Denne kombinasjonen danner de endelige RAO for bevegelse i z-retning mellom overflatehevingen og punktene. RAO for relativ respons sammen med valgte bølgespekter fra lokasjon 2 og lokasjon 3 danner responsspektre. Dette konseptet blir i *Prediction of air gap for column stabilised units* omtalt som air gap [11]. Air gap er opprinnelig en måte å undersøke om bølger vil kunne «slå» under dekk. For denne rapporten skal samme framgangsmåte benyttes for å beregne om det vil oppstå vann over dekk på SalMar.



Figur 25: Airgap [11]

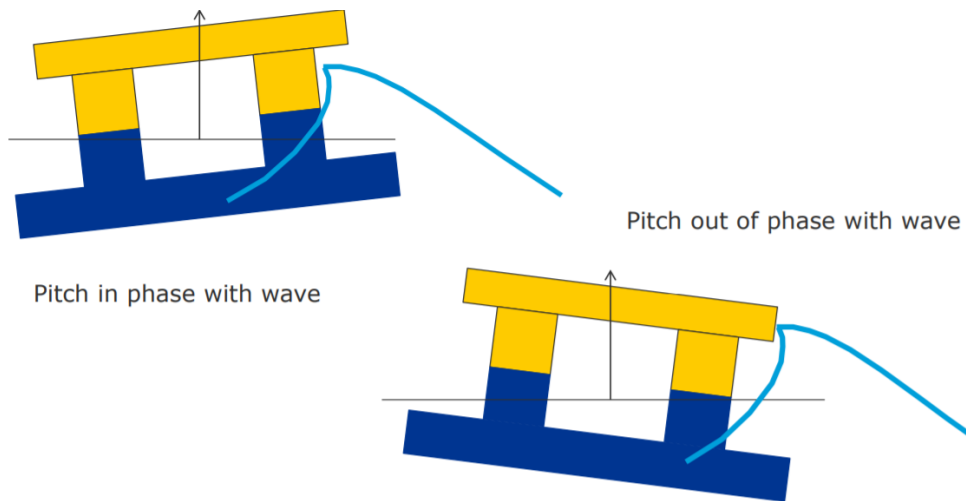
$$\text{Relativ respons} = \zeta_R = \alpha \cdot \zeta_B - \zeta_p \quad [3.14]$$

Formel 3.14 viser hvordan den relative avstanden mellom bølgetopp og et gitt fast punkt på konstruksjonen beregnes. Her betegnes relativ respons som  $\zeta_R$ ,  $\zeta_B$  er responsen til overflatehevingen og  $\zeta_p$  er responsen til det valgte punktet. Denne responsvariabelen vil så gi oss den relative avstanden når vi danner responsspekteret ved bruk av disse relative responsvariablene sammen med valgte bølgespekter. For å undersøke om det oppstår vann over dekk trekkes det så fra fribordet i formel 3.15

$$\chi_R - f_{min} = \text{relativ bølgehøyde over dekk} [3.15]$$

Der  $\chi_R$  er relativ bevegelse i meter og  $f_{min}$  er minimum fribord.

En viktig feilkilde som bør nevnes er at man ikke vet om konstruksjonen er i mot- eller medfase med bølgen [11]. Dette illustreres i figuren under. Når leseren kommer til resultat delen bør hen ta dette fenomenet til betraktning.



Figur 26: mot- og medfase mellom konstruksjon og bølge

### 3.5.5 Akselerasjon og rotasjon

Det er som nevnt ingen restriksjoner på hvordan en førflåte skal bevege seg utenom stabilitetskrav i NS9415. Selv om flåten er stabil, kan likevel noen bevegelser være særs ugunstige for personell ombord. Disse bevegelsene kan føre til sjøsyke eller skader på personell og det er derfor nødvendig å se om slike bevegelser vil oppstå. NORDFORSK er et nordisk samarbeidsprosjekt som i 1987 lagde kriterier for vertikale og laterale akselerasjoner og *rull* om bord på skip [4]. Disse verdiene vises i *Tabell 12*.

Tabell 12: NORDFORSK's kriterier for akselerasjon [4]

| Criteria for Acceleration and Roll<br>(NORDFORSK, 1987) |                           |                          |                 |
|---|---------------------------|--------------------------|-----------------|
| Description   | RMS Vertical Acceleration | RMS Lateral Acceleration | RMS Roll Motion |
| Light Manual Work                                       | 0.20 g                    | 0.10 g                   | 6.0°            |
| Heavy Manual Work                                       | 0.15 g                    | 0.07 g                   | 4.0°            |
| Intellectual Work                                       | 0.10 g                    | 0.05 g                   | 3.0°            |
| Transit Passengers                                      | 0.05 g                    | 0.04 g                   | 2.5°            |
| Cruise Liner  | 0.02 g                    | 0.03 g                   | 2.0°            |

I Sintef's rapport er det valgt kriteriene for tungt manuelt arbeid (Heavy Manual Work) i sin forskning og det er da naturlig at det samme blir brukt i denne rapporten [3]. Den vertikale og laterale akselerasjonen tilsvarer henholdsvis  $1,4715 \left[\frac{m}{s^2}\right]$  og  $0,6867 \left[\frac{m}{s^2}\right]$  med en rullebevegelse på 4 grader. Det er disse verdiene det sammenlignes med videre i rapporten.

## 4.0 Resultater

I denne delen blir det presentert utvalgte resultater som er relevant for denne rapporten. Dette kapittelet tar for seg hydrostatiske og hydrodynamiske resultater som undersøkes opp mot gjeldende regelverk. Resultatene blir også sammenlignet med tidligere forskning for å se om det er likheter/ulikheter. Senere i rapporten skal disse resultatene brukes for å lage en konklusjon av forskningen.

### 4.1 Hydrostatiske resultater

Om flåtene ikke oppfyller stabilitetskrav, vil den ikke kunne bygges i henhold til Norsk Standard og den er da ikke godkjent for bruk. Instabilitet kan også resultere i betydelig skade på materiell, miljø og menneske. Derfor er det krav om stabilitet i NS9415 [12]. Stabiliteten til SalMar undersøkes kun opp mot regelverket i lastkondisjon 1 (lettskips) intakt. Bakgrunnen for å gjennomføre stabilitetsanalysen er for å bekrefte at modellert flåte er ihht. krav, før de hydrodynamiske analysene gjennomføres. Kravene gjengis i *tabell 13* for bedre oversikt ved gjennomgang av resultatene.

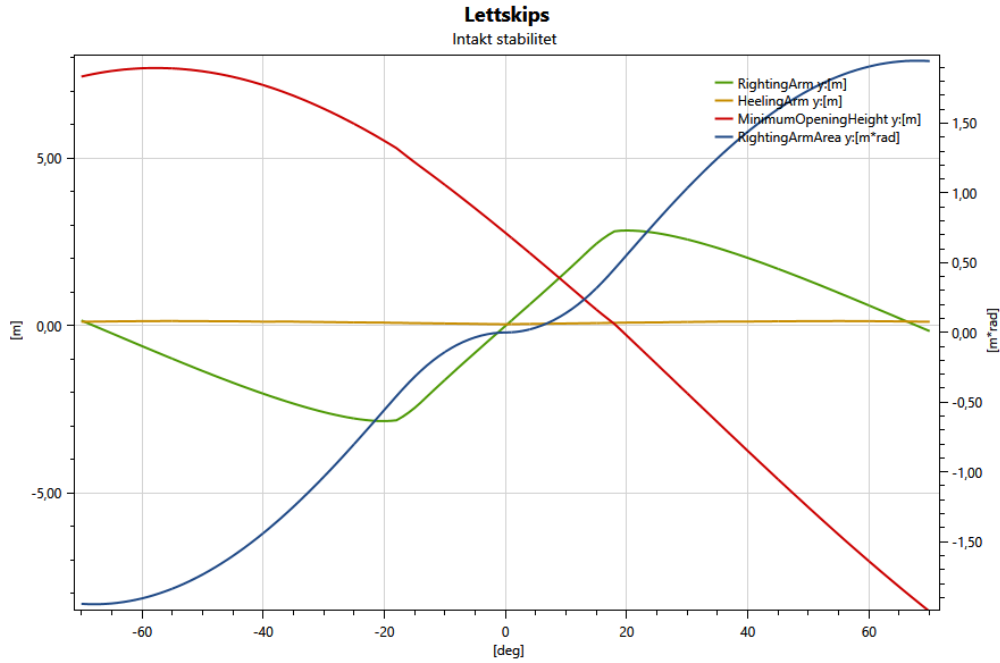
*Tabell 13: Stabilitetskrav og resultater*

| Stabilitetskrav |   |
|-----------------|---|
| 1.              | Arealet under GZ-kurven fra 0 grader til maksimalt rettende arm skal ikke være mindre enn 0,08 [m-rad]  |
| 2.              | Statisk krengeving forårsaket av en jevnt fordelt last pålydende 0,54 KPa (tilsvarende vindfart 30 m/s), skal ikke overskride en krengeving tilsvarende halve fribordet i gjeldene tilstand. Armen i vindmomentet skal måles fra senter i arealet vinden virker på til halve dyppgangen |
| 3.              | GZ skal være positiv til 15 grader som et minimum   |

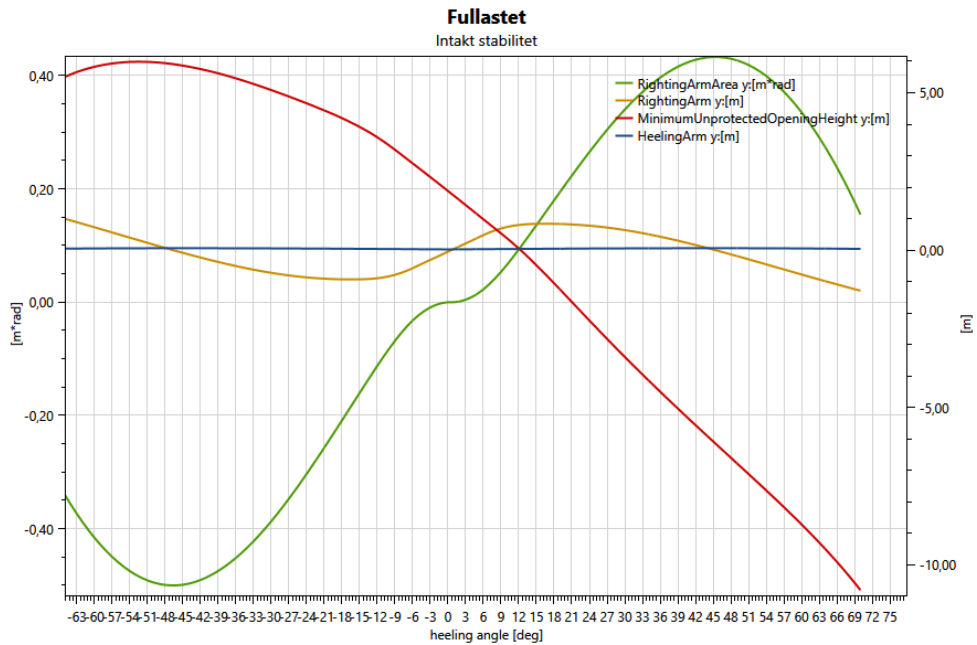
*Tabell 14: resultat stabilitetskrav lettskips*

| Intakt        | Stabilitetskrav | 1          | 2       | 3                            | Status |
|---------------|-----------------|------------|---------|------------------------------|--------|
| Lastkondisjon |                 |            |         |                              |        |
| 1             |                 | 0,555 mrad | 0,05 m  | Siste + krengeving 67 grader | Ok     |
| 2             |                 | 0,165 mrad | 0,025 m | Siste + krengeving 45 grader | Ok     |

SalMar tilfredsstillere alle stabilitetskrav fra NS9415 med relativ god margin i intakt. Fra stabilitetskrav 3 i *tabell 14*, kan man lese at GZ er positiv helt opp til 67 grader for lettskips og 45 grader for fullastet. Dette betyr at ved en større helningsvinkel vil stabiliteten forsvinne. Denne verdien er noe man må undersøke opp mot i den hydrodynamiske analysen. Grafene for de to stabilitetsanalysene kan leses av *figur 27* og *figur 28* nedenfor.



Figur 27: Intakt stabilitet lettskips



Figur 28: Intakt stabilitet fullastet

Den røde linjen viser minimum ubeskyttet åpningshøyde. Denne viser når helningen er så høy at åpningen (som er porten front babord på flåten) er under vann og skott innenfor vil fylles med vann. Den grønne linjen viser arealet under GZ armen. Den blå linjen viser kregende arm og den gule linjen representerer GZ armen.



## 4.2 Hydrodynamiske resultater

Ved valgt  $T_z$  intervall for ulike signifikante bølgehøyder vil flåten undersøkes i hvilken grad den følger bevegelsene til vannoverflaten. I delkapittel 4.2.1 skal det gjennomføres en sammenligning mellom SalMar flåte og Sintef flåte. Ved å sammenligne responsene kan det antas at de responsene som genereres i HydroD er pålitelige. Denne sammenligningen utføres med sjøtilstanden kalt lokasjon 1 og tilstanden som benyttes er lettskips. Deretter gjennomføres analysen av de to resterende lokasjonene kalt lokasjon 2 og lokasjon 3.

### 4.2.1 Sammenligning av flåter $H_s = 1.0$ [m] [3]

#### Bølgeretning møtende sjø (0 grader)

Tabell 15: Globale bevegelser i nullpunktet til koordinatsystemet Sintef og SalMar flåte

| Frihetsgrad            | Sintef flåte |            | SalMar flåte |             |
|------------------------|--------------|------------|--------------|-------------|
|                        | RMS          | Max. verdi | RMS          | Max. verdi  |
| Jag (surge) [m]        | 0.0134       | 0.0552     | 0.0506       | 0.08486     |
| Svai (sway) [m]        | 0.0          | 0.0        | $\approx 0$  | $\approx 0$ |
| Hiv (heave) [m]        | 0.01607      | 0.0638     | 0.0196       | 0.04203     |
| Rull (roll) [grader]   | 0.0          | 0.0        | $\approx 0$  | $\approx 0$ |
| Stamp (pitch) [grader] | 0.1483       | 0.6371     | 0.212        | 0.493       |
| Gir (yaw) [grader]     | 0.0          | 0.0        | $\approx 0$  | $\approx 0$ |

Tabell 16: Akselerasjon i x, y, z retning for punkt i baug. Sintef flåte og SalMar flåte

| Punkt | Frihetsgrad | Sintef flåte            |   | SalMar flåte            |   |             |
|-------|-------------|-------------------------|---|-------------------------|---|-------------|
|       |             | RMS [ $\frac{m}{s^2}$ ] | Max. verdi akselerasjon [ $\frac{m}{s^2}$ ] | RMS [ $\frac{m}{s^2}$ ] | Max. verdi akselerasjon [ $\frac{m}{s^2}$ ] |             |
| 1     | baug        | x                       | 0.07553                                     | 0.3197                  | 0.268                                       | 0.3634      |
|       |             | y                       | 0.0   | 0.0                     | $\approx 0$                                 | $\approx 0$ |
|       |             | z                       | 0.2067                                      | 0.7923                  | 0.047                                       | 0.1115      |

Tabell 17: Maksimum relativ bølgehøyde over dekk SalMar flåte og Sintef flåte

| konstruksjon | Punkt 1 | Punkt 2 | Punkt 3 | Punkt 4 | Punkt 5 | Punkt 6 |
|--------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Sintef       | 0.134   | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0     |         |
| SalMar       | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0     |

*Bølgeretning skråsjø (45 grader)*

Tabell 18: Globale bevegelser i nullpunktet til koordinatsystemet

| Frihetsgrad            | Sintef flåte |            | SalMar flåte |            |
|------------------------|--------------|------------|--------------|------------|
|                        | RMS          | Max. verdi | RMS          | Max. verdi |
| Jag (surge) [m]        | 0.01266      | 0.05619    | 0.01561      | 0.02977    |
| Svai (sway) [m]        | 0.0123       | 0.05135    | 0.0148       | 0.02808    |
| Hiv (heave) [m]        | 0.02461      | 0.09846    | 0.0191       | 0.04586    |
| Rull (roll) [grader]   | 0.1488       | 0.6012     | 0.176        | 0.426      |
| Stamp (pitch) [grader] | 0.2444       | 1.109      | 0.278        | 0.66       |
| Gir (yaw) [grader]     | 0.1596       | 0.6879     | 0.198        | 0.418      |

Tabell 19: Akselerasjon i x, y, z retning for punkt i baug. Sinteflåte.

| Punkt | Frihetsgrad | Sintef flåte            |   | SalMar flåte            |   |        |
|-------|-------------|-------------------------|---|-------------------------|---|--------|
|       |             | RMS [ $\frac{m}{s^2}$ ] | Max. verdi akselerasjon [ $\frac{m}{s^2}$ ] | RMS [ $\frac{m}{s^2}$ ] | Max. verdi akselerasjon [ $\frac{m}{s^2}$ ] |        |
| 1     | Baug        | x                       | 0.02259                                     | 0.1068                  | 0.077                                       | 0.1433 |
|       |             | y                       | 0.1598                                      | 0.7191                  | 0.0367                                      | 0.1297 |
|       |             | z                       | 0.2631                                      | 1.212                   | 0.073                                       | 0.1732 |

Tabell 20: Maksimum relativ bølgehøyde over dekk, SalMar flåte og Sinteflåte

| Konstruksjon | Punkt 1 | Punkt 2 | Punkt 3 | Punkt 4 | Punkt 5 | Punkt 6 |
|--------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Sintef       | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0     |         |
| SalMar       | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0     |

*Bølgeretning sidesjø (90 grader)*

Tabell 21: Globale bevegelser i nullpunktet til koordinatsystemet

| Frihetsgrad            | Sintef flåte          |                       | SalMar flåte           |                       |
|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
|                        | RMS                   | Max. verdi            | RMS                    | Max. verdi            |
| Jag (surge) [m]        | $2.21 \cdot 10^{-3}$  | $8.047 \cdot 10^{-3}$ | $1.4955 \cdot 10^{-4}$ | $1.741 \cdot 10^{-4}$ |
| Svai (sway) [m]        | 0.0399                | 0.1731                | 0.0954                 | 0.1552                |
| Hiv (heave) [m]        | 0.05345               | 0.2376                | 0.0514                 | 0.113                 |
| Rull (roll) [grader]   | 0.4963                | 2.262                 | 0.8                    | 1.78                  |
| Stamp (pitch) [grader] | $5.426 \cdot 10^{-3}$ | 0.02305               | $\approx 0$            | $\approx 0$           |
| Gir (yaw) [grader]     | $3.993 \cdot 10^{-3}$ | 0.01724               | $\approx 0$            | $\approx 0$           |

Tabell 22: Akselerasjon i x, y, z retning for punkt i baug, Sintef flåte.

| Punkt | Frihetsgrad | Sintef flåte            |   | SalMar flåte            |   |          |
|-------|-------------|-------------------------|---|-------------------------|---|----------|
|       |             | RMS [ $\frac{m}{s^2}$ ] | Max. verdi akselerasjon [ $\frac{m}{s^2}$ ] | RMS [ $\frac{m}{s^2}$ ] | Max. verdi akselerasjon [ $\frac{m}{s^2}$ ] |          |
| 1     | Baug        | x                       | $9.9 \cdot 10^{-3}$                         | 0.03726                 | $\approx 0$                                 | 0.002139 |
|       |             | y                       | 0.2093                                      | 0.9123                  | 0.115                                       | 0.2016   |
|       |             | z                       | 0.1885                                      | 0.7671                  | 0.051                                       | 0.1131   |

Tabell 23: Maksimum relativ bølgehøyde over dekk, SalMar flåte og Sintef flåte

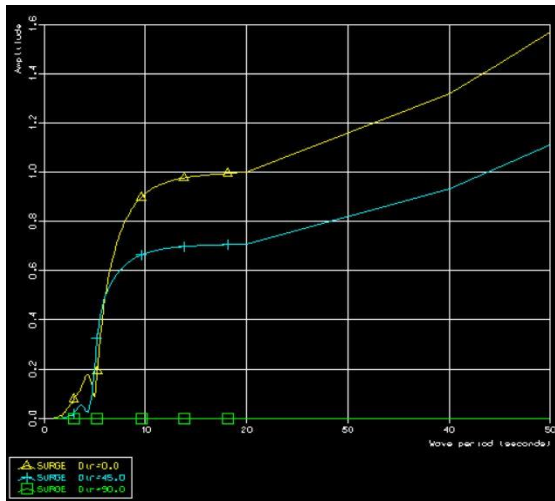
| Konstruksjon | Punkt 1 | Punkt 2 | Punkt 3 | Punkt 4 | Punkt 5 | Punkt 6 |
|--------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Sintef       | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.094   | 0.315   |         |
| SalMar       | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0     |

*Oppsummering på sammenligning av SalMar flåte og Sintef flåte*

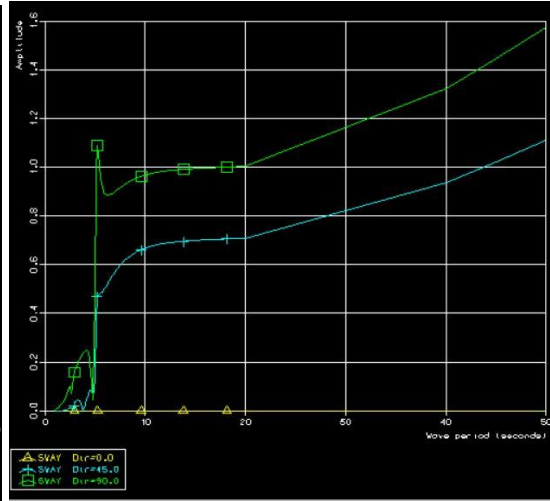
Det kan konkluderes med at modellen modellert for denne rapporten ikke avviker fra resultatene i Sintef rapporten. Differansen mellom translasjoner, rotasjoner og relativ bevegelse er minimale. Det kan lese at maksimalverdier og RMS tilhørende SalMar flåte ligger på de fleste punkt litt under Sintef flåtens verdier. Det er fornuftige resultater siden SalMar er tyngre og har noe større hoveddimensjoner. Disse små avvikene/differansene kan også skyldes ulike egenperiode i flåten.

4.2.2  $H_s = 3.5$  [m] lettships

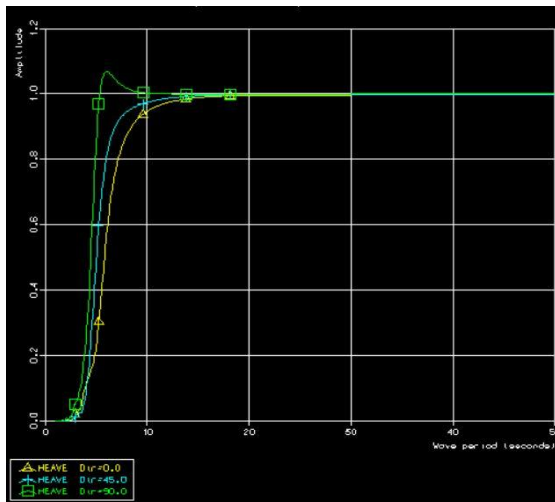
RAO lettships 0, 45 og 90 grader



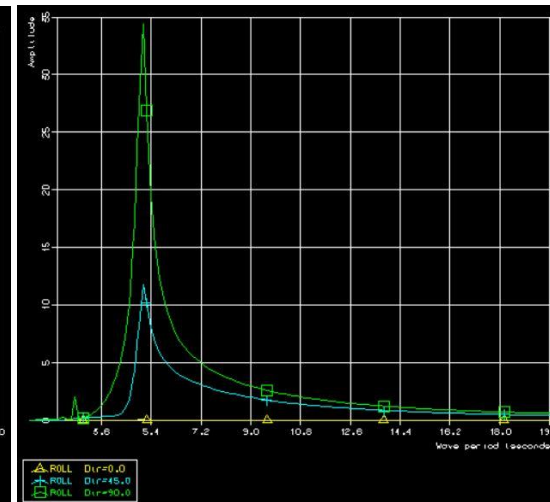
Figur 29: Jag



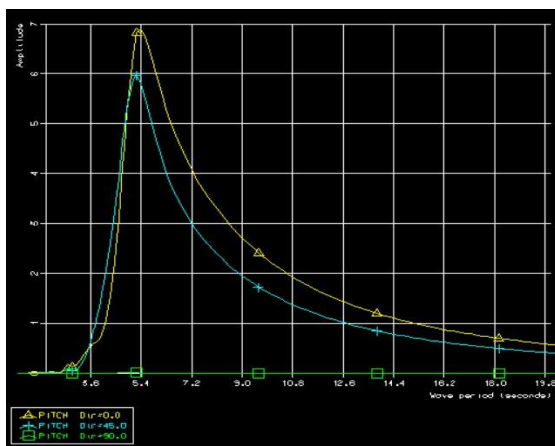
Figur 30: Svai



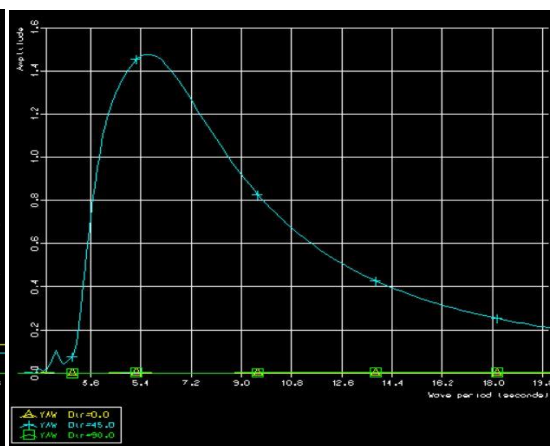
Figur 31: Hiv



Figur 32: Rull



Figur 33: Stamp



Figur 34: Gir

Plottene som fremstilles i figur 29 til figur 31 ovenfor viser RAO for translasjonene *jag*, *svai* og *hiv*. Figur 32 til figur 34 viser RAO for rotasjonene *rull*, *stamp* og *gir*. Disse RAO er beregnet i nullpunktet til det globale koordinatsystemet i Postresp. Plottene viser amplituden på y-aksen som funksjon av bølgeperiode på x-akse. De kurvene som er gule representerer en bølgeretning fra 0 grader, blå graf representerer bølgeretning 45 grader og grønn graf representerer bølgeretning fra 90 grader.

Amplituden øker med økende bølgeperiode for *jag* og *svai*. *Jag* gir størst utslag når bølgeretningen er null grader, Samtidig kan man se at den største responsen for *svai* vil oppstå når bølgeretningen er 90 grader. I begge tilfellene vil amplituden øke med økende bølgeperiode. Likheten mellom disse translasjonene er at etter bølgeperioden har passert 5 [s] er responsen i det området som kalles bølgefrekvensområdet og det er i dette området man vil få de største translasjonene i x og y retning i flåten.

RAO til *hiv* øker til den når en topp der bølgeperioden er 6 [s] ved en bølgeretning fra 90 grader, deretter vil responsen falle til en stabil verdi rett i underkant av den høyeste amplituden på lik linje med resterende bølgeretninger. Responsen i *hiv* vil på dette tidspunktet ligge på en stabil amplitude med økende bølgeperiode.

Responsvariabelen til *rull* når en topp ved bølgeperiode på 5.1 [s]. Ved bølgeperioder over og under fem [s] vil responsen falle drastisk og gå mot null ved økende eller synkende bølgeperioder. Den minst gunstige situasjonen for *rull* i lettskips tilstand vil være når topp perioden til et bølgespekter sammenfaller med egenperioden til flåten i *rull* (5.1 [s]). Det er i denne situasjonen man kan anta størst rotasjon i *rull*.

*Stamp* vil på samme måte som *rull* ha en økende respons ved økende bølgeperioder opp til en bølgeperiode på 5.2 [s] hvor responsvariabelen til *stamp* når sin topp. Deretter faller responsen gradvis mot null med økende bølgeperiode. Sammenlignet med *rull* har *stamp* en bredere kurveform og vil i større grad, gradvis avta med økende bølgeperiode. Den minst gunstige situasjonen for *stamp* er som for *rull* når flåten er plassert på lokasjoner med bølgeperioder på rundt 5 [s].

*Gir* vil øke til den når sin topp rundt fem [s] for så å gradvis avta mot null når bølgeperioden går mot uendelig. Her er det kun i en bølgeretning på 45 grader som vil gi vesentlige utslag. Bølgeperioder som gir størst respons for de ulike bevegelsene i lettskips er:

- *Jag* og *svai*: høye bølgeperioder rundt 10 [s]
- *Hiv*: Området rundt 6 [s]
- *Rull*, *stamp* området mellom 5 [s] og 6 [s]

Under responsvariablene for fullt lastet senere i resultatene vil det kun kommenteres om det er store forskjeller i RAO.

*Bølgeretning møtende sjø (0 grader)*

Tabell 24: Globale bevegelser i nullpunktet til koordinatsystemet

| Frihetsgrad            | RMS         | Max. verdi  | $T_z$ [s] | $T_{resp}$ [s] | Bølgelengde [m] |
|------------------------|-------------|-------------|-----------|----------------|-----------------|
| Jag (surge) [m]        | 2.604       | 2.927       | 9.4       | 10.902         | 186             |
| Svai (sway) [m]        | $\approx 0$ | $\approx 0$ |           |                |                 |
| Hiv (heave) [m]        | 2.7643      | 3.017       | 9.4       | 10.751         | 180             |
| Rull (roll) [grader]   | 0.013       | 0.02        | 5.5       | 5.004          | 39              |
| Stamp (pitch) [grader] | 11.4        | 15          | 5.5       | 6.180          | 60              |
| Gir (yaw) [grader]     | $\approx 0$ | $\approx 0$ |           |                |                 |

Tabell 25: Akselerasjoner i x, y, z retning for styrehuset

| Punkt | Koordinat [m] | Frihetsgrad | RMS [ $\frac{m}{s^2}$ ] | Max. verdi [ $\frac{m}{s^2}$ ] | $T_z$ [s] |     |
|-------|---------------|-------------|-------------------------|--------------------------------|-----------|-----|
| 1     | X             | 10.36       | x                       | 1.14                           | 1.436     | 5.5 |
|       | Y             | 0.0         | y                       |                                |           |     |
|       | Z             | 6.714       | z                       | 2.42                           | 3.314     | 5.5 |

Tabell 26: Relativ bølgehøyde over dekk

| Punkt | Koordinat [m] | RMS [m] | Max. verdi [m] | $T_z$ [s] | Min. verdi [m] | $T_z$ [s] | Bølgelengde [m] | Fribord [m] |       |
|-------|---------------|---------|----------------|-----------|----------------|-----------|-----------------|-------------|-------|
| 1     | X             | 16.9    | 2.47           | 3.678     | 5.5            | 1.574     | 9.4             | 50          | 2.704 |
|       | Y             | 0.0     |                |           |                |           |                 |             |       |
|       | Z             | 2.704   |                |           |                |           |                 |             |       |
| 2     | X             | 16.5    | 1.96           | 2.892     | 5.5            | 1.308     | 9.4             | 42          | 2.704 |
|       | Y             | 8.0     |                |           |                |           |                 |             |       |
|       | Z             | 2.704   |                |           |                |           |                 |             |       |
| 3     | X             | 0       | 1.85           | 2.449     | 5.5            | 1.405     | 9.4             | 28          | 2.704 |
|       | Y             | 8.49    |                |           |                |           |                 |             |       |
|       | Z             | 2.704   |                |           |                |           |                 |             |       |

Tabell 27: Maksimum relativ bølgehøyde over dekk

| Punkt 1 | Punkt 2 | Punkt 3 | Punkt 4 | Punkt 5 | Punkt 6 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0.974   | 0.188   | 0       |         |         |         |

Tabell 28: Minimum relativ bølgehøyde over dekk

| Punkt 1 | Punkt 2 | Punkt 3 | Punkt 4 | Punkt 5 | Punkt 6 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0       | 0       | 0       |         |         |         |

*Bølgeretning skråsjø (45 grader)*

Tabell 29: Globale bevegelser i nullpunktet til koordinatsystemet

| Frihetsgrad            | RMS    | Max. verdi | $T_z$ [s] | $T_{resp}$ [s] | Bølgelengde [m] |
|------------------------|--------|------------|-----------|----------------|-----------------|
| Jag (surge) [m]        | 1.992  | 2.149      | 9.4       | 10.645         | 177             |
| Svai (sway) [m]        | 1.996  | 2.146      | 9.4       | 10.601         | 175             |
| Hiv (heave) [m]        | 2.987  | 3.126      | 9.4       | 10.442         | 170             |
| Rull (roll) [grader]   | 10.257 | 14.152     | 5.5       | 5.785          | 52              |
| Stamp (pitch) [grader] | 8.920  | 12.06      | 5.5       | 5.944          | 38              |
| Gir (yaw) [grader]     | 3.411  | 4.279      | 5.5       | 6.121          | 58              |

Tabell 30: Akselerasjoner i x, y, z retning for styrehuset

| Punkt | Koordinat [m] | Frihetsgrad | RMS $\frac{m}{s^2}$ | Max. verdi $\frac{m}{s^2}$ | $T_z$ [s] |       |     |
|-------|---------------|-------------|---------------------|----------------------------|-----------|-------|-----|
| 1     | Styrehus      | X           | 10.36               | x                          | 0.85      | 1.073 | 5.5 |
|       |               | Y           | 0.0                 | y                          | 0.99      | 1.299 | 5.5 |
|       |               | Z           | 6.714               | z                          | 2.49      | 3.436 | 5.5 |

Tabell 31: Relativ bølgehøyde over dekk

| Punkt | Koordinat [m]       | RMS [m] | Max. verdi [m] | $T_z$ [s] | Min. verdi [m] | $T_z$ [s] | Bølgelengde [m] | Fribord [m] |    |       |
|-------|---------------------|---------|----------------|-----------|----------------|-----------|-----------------|-------------|----|-------|
| 1     | Front senter        | X       | 16.9           | 1.48      | 2.126          | 5.5       | 1.085           | 9.4         | 37 | 2.704 |
|       |                     | Y       | 0.0            |           |                |           |                 |             |    |       |
|       |                     | Z       | 2.704          |           |                |           |                 |             |    |       |
| 2     | Front hjørne babord | X       | 16.5           | 3.05      | 4.545          | 5.5       | 1.907           | 9.4         | 49 | 2.704 |
|       |                     | Y       | 8.0            |           |                |           |                 |             |    |       |
|       |                     | Z       | 2.704          |           |                |           |                 |             |    |       |
| 3     | Babord senter       | X       | 0              | 1.09      | 1.251          | 5.5       | 1.002           | 9.4         | 32 | 2.704 |
|       |                     | Y       | 8.49           |           |                |           |                 |             |    |       |
|       |                     | Z       | 2.704          |           |                |           |                 |             |    |       |

Tabell 32: Maksimum relativ bølgehøyde over dekk

| Punkt 1 | Punkt 2 | Punkt 3 | Punkt 4 | Punkt 5 | Punkt 6 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0       | 1.841   | 0       |         |         |         |

Tabell 33: Minimum relativ bølgehøyde over dekk

| Punkt 1 | Punkt 2 | Punkt 3 | Punkt 4 | Punkt 5 | Punkt 6 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0       | 0       | 0       |         |         |         |

*Bølgeretning sidesjø (90 grader)*

Tabell 34: Globale bevegelser i nullpunktet til koordinatsystemet

| Frihetsgrad            | RMS         | Max. verdi [m] | $T_z$ [s] | $T_{resp}$ [s] | Bølgelengde [m] |
|------------------------|-------------|----------------|-----------|----------------|-----------------|
| Jag (surge) [m]        | $\approx 0$ | $\approx 0$    |           |                |                 |
| Svai (sway) [m]        | 3.0285      | 3.135          | 9.4       | 10.275         | 165             |
| Hiv (heave) [m]        | 3.268       | 3.282          | 7.3       | 8.130          | 103             |
| Rull (roll) [grader]   | 23.4        | 33.8           | 5.5       | 5.397          | 45              |
| Stamp (pitch) [grader] | $\approx 0$ | $\approx 0$    |           |                |                 |
| Gir (yaw) [grader]     | $\approx 0$ | $\approx 0$    |           |                |                 |

Tabell 35: Akselerasjoner i x, y, z retning for styrehuset

| Punkt | Koordinat [m] | Frihetsgrad | RMS [ $\frac{m}{s^2}$ ] | Max. verdi [ $\frac{m}{s^2}$ ] | $T_z$ [s] |
|-------|---------------|-------------|-------------------------|--------------------------------|-----------|
| 1     | Styrehus      | X           | 10.36                   | x                              |           |
|       |               | Y           | 0.0                     | y                              | 2.97      |
|       |               | Z           | 6.714                   | z                              | 2.28      |



Tabell 36: Relativ bølgehøyde over dekk

| Punkt |                     | Koordinat [m] |       | RMS [m] | Max. verdi [m] | $T_z$ [s] | Min. verdi [m] | $T_z$ [s] | Bølgelengde [m] | Fribord [m] |
|-------|---------------------|---------------|-------|---------|----------------|-----------|----------------|-----------|-----------------|-------------|
| 1     | Front senter        | X             | 16.9  | 1.37    | 1.746          | 5.5       | 1.133          | 9.4       | 19              | 2.704       |
|       |                     | Y             | 0.0   |         |                |           |                |           |                 |             |
|       |                     | Z             | 2.704 |         |                |           |                |           |                 |             |
| 2     | Front hjørne babord | X             | 16.5  | 2.35    | 3.393          | 5.5       | 1.557          | 9.4       | 36              | 2.704       |
|       |                     | Y             | 8.0   |         |                |           |                |           |                 |             |
|       |                     | Z             | 2.704 |         |                |           |                |           |                 |             |
| 3     | Babord senter       | X             | 0     | 2.48    | 3.611          | 5.5       | 1.618          | 9.4       | 41              | 2.704       |
|       |                     | Y             | 8.49  |         |                |           |                |           |                 |             |
|       |                     | Z             | 2.704 |         |                |           |                |           |                 |             |
| 4     | Hekk hjørne babord  | X             | -16.5 | 2.35    | 3.392          | 5.5       | 1.556          | 9.4       | 36              | 2.704       |
|       |                     | Y             | 8.0   |         |                |           |                |           |                 |             |
|       |                     | Z             | 2.704 |         |                |           |                |           |                 |             |
| 5     | Hekk senter         | X             | -16.9 | 1.37    | 1.749          | 5.5       | 1.134          | 9.4       | 19              | 2.704       |
|       |                     | Y             | 0     |         |                |           |                |           |                 |             |
|       |                     | Z             | 2.704 |         |                |           |                |           |                 |             |

Tabell 37: Maksimum relativ bølgehøyde over dekk i [m]

| Punkt 1 | Punkt 2 | Punkt 3 | Punkt 4 | Punkt 5 | Punkt 6 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0       | 0.689   | 0.907   | 0.688   | 0       |         |

Tabell 38: Minimum relativ bølgehøyde over dekk i [m]

| Punkt 1 | Punkt 2 | Punkt 3 | Punkt 4 | Punkt 5 | Punkt 6 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0       | 0       | 0       | 0       | 0       |         |

### Oppsummering av tilstand lettskips 0, 45 og 90 grader

#### Translasjoner

Flåten har størst respons i hhv. *Jag*, *svai* og *hiv* ved høye bølgeperioder og lange bølgelengder. For *jag* er det beregnet en maksimalverdi på 2.927 [m] med en  $T_z$  på 9.4 [s]. Bølgeperioden som gir størst utslag er 11 [s] ( $T_{resp}$ ) og møtende sjø [Tabell 24]. For *svai* er det beregnet en maksimalverdi på 3.135 [m] med samme  $T_z$  som for *jag*. Bølgeperioden som gir størst utslag er 10.3 [s] og sidesjø [Tabell 34]. For *hiv* er det sidesjø som gir maksimal respons og er beregnet til 3.282 [m] [Tabell 34]. Størst utslag i *hiv* oppstår ved en bølgeperiode på 8.13 [s].

#### Rotasjoner

Flåten har størst RMS i henholdsvis *rull*, *stamp* og *gir* ved lave bølgeperioder og korte bølgelengder. For *rull* er det beregnet en RMS på 23.4 [grader] under en sjøtilstand med  $T_z$  på 5.5 [s]. Bølgeperioden som gir størst *rull* er 5.4 [s] og sidesjø [Tabell 34]. Den største RMS verdien til *stamp* er beregnet til 11.4 grader med en  $T_z$  på 5.5 [s]. Bølgeperioden som gir størst rotasjon i *stamp* er 5 [s] og møtende sjø [Tabell 24]. Maksimal RMS verdi for *gir* er beregnet til 3.4 [grader] og  $T_z$  er 5.5 [s]. Bølgeperioden som gir størst utslag i *gir* er 6.1 [s] og skråsjø [Tabell 29]. Kriteriet for tungt, manuelt arbeid er ifølge NORDFORSK 4 grader [4].

#### Akselerasjoner i styrehuset

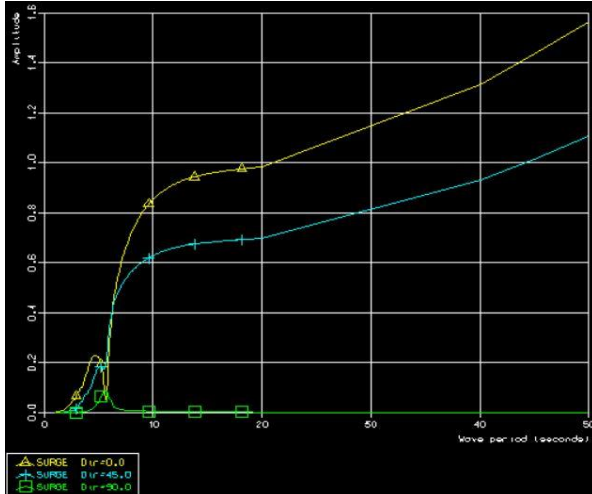
Den største RMS for horisontal akselerasjonen beregnet i styrehuset oppstår under sidesjø [Tabell 35]. Denne akselerasjonen er beregnet til  $2.96 \frac{m}{s^2}$  (0.3g) i y-retning. For akselerasjon i vertikal retning oppstår den største beregnede RMS verdien på  $2.49 \frac{m}{s^2}$  (0.25g) i z-retning ved skråsjø [Tabell 30].

#### Relativ bølgehøyde

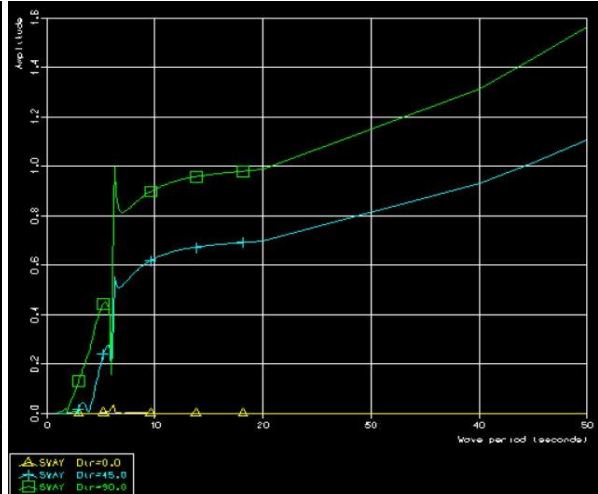
Det er beregnet vannoverslag i alle tre bølgeretninger når  $T_z$  er på 5.5 [s]. Maksimal beregnet overslag av vann er beregnet til 1.841 [m] over dekk i punkt 2 ved skråsjø [Tabell 32]. Det er ikke beregnet vannoverslag når  $T_z$  er 9.4 [s].

4.2.3  $H_s = 3.5$  [m] fullastet

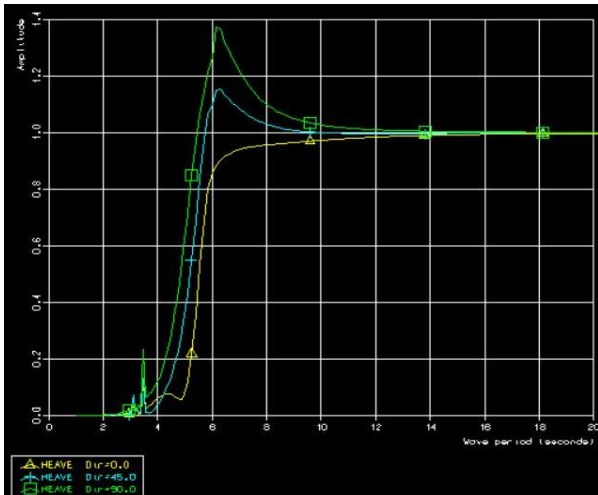
Responsvariabler 0, 45 og 90 grader



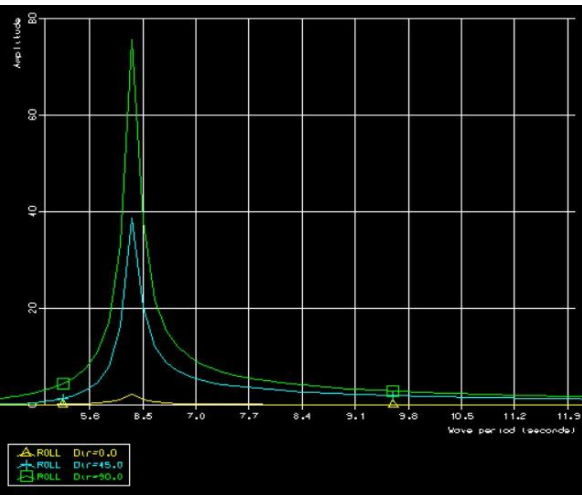
Figur 35: Jag



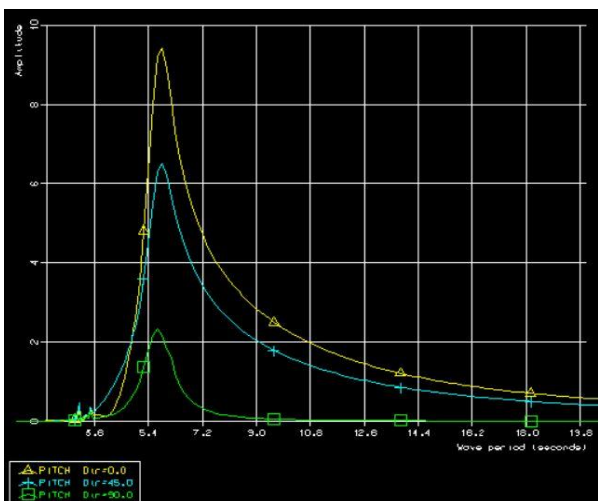
Figur 36: Svai



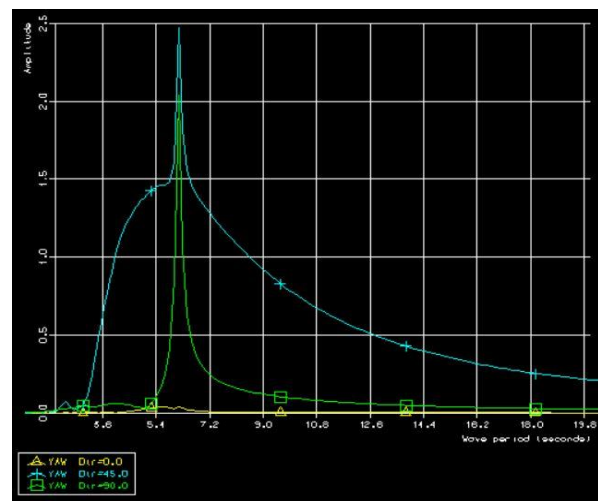
Figur 37: Hiv



Figur 38: Rull



Figur 39: Stamp



Figur 40: Gir

Sammenlignet med RAO for SalMar lettskips kan man se en endring i RAO fullastet i *hiv* figur 36. For bølgeretning 90 og 45 grader kan man lese av enda tydeligere og større topp amplituder ved fullastet tilstand. Toppene oppstår ved bølgeperioder rett i overkant av 6 [s]. Allerede her kan man anta at maksimal *hiv* bevegelse vil være større for en fullastet flåte sammenlignet med lettskips. Maksimal *hiv* respons vil for fullastet oppstå under bølgeretning 90 grader og bølgeperioder rundt 6 [s].

RAO i *gir* har også endret seg for fullastet. Hvor *gir* kun gav utslag med en bølgeretning fra 45 grader for lettskips vil det også oppstå respons når bølgeretningen er 90 grader for fullastet. Amplituden er også større for fullastet.

Formen til RAO kurvene i de resterende frihetsgradene er like, men amplitudene har endret seg. For *svai* er det en reduksjon i amplitude ved bølgeperioder på 6 til 7 [s]. For *jag* er det tilnærmet ingen endring. Topp amplituden i *rull* har økt i området hvor bølgeperioden er på omtrent 6 [s]. Dette har det også gjort for *stamp*. Man kan derfor også si at *rull* og *stamp* vil være større for fullastet tilstand sammenlignet med lettskips.

*Bølgeretning møtende sjø (0 grader)*

Tabell 39: Globale bevegelser i nullpunktet til koordinatsystemet

| Frihetsgrad            | RMS         | Max. verdi  | $T_z$ [s] | $T_{z,resp}$ [s] | Bølgelengde [m] |
|------------------------|-------------|-------------|-----------|------------------|-----------------|
| Jag (surge) [m]        | 2.39        | 2.764       | 9.4       | 11.06            | 191             |
| Svai (sway) [m]        | $\approx 0$ | $\approx 0$ |           |                  |                 |
| Hiv (heave) [m]        | 2.99        | 3.120       | 9.4       | 10.48            | 172             |
| Rull (roll) [grader]   | $\approx 0$ | $\approx 0$ |           |                  |                 |
| Stamp (pitch) [grader] | 12.93       | 17.67       | 5.5       | 6.36             | 63              |
| Gir (yaw) [grader]     | $\approx 0$ | $\approx 0$ |           |                  |                 |

Tabell 40: Akselerasjoner i x, y, z retning for styrehuset

| Punkt      | Koordinat [m] | Frihetsgrad | RMS [ $\frac{m}{s^2}$ ] | Max. verdi akselerasjon [ $\frac{m}{s^2}$ ] | $T_z$ [s] |
|------------|---------------|-------------|-------------------------|---|-----------|
| 1 Styrehus | X 10.36       | x           | 1.29                    | 1.773                                       | 5.5       |
|            | Y 0.0         | y           |                         |   |           |
|            | Z 6.714       | z           | 3.73                    | 4.083                                       | 5.5       |

Tabell 41: Relativ bølgehøyde over dekk

| Punkt                 | Koordinat [m] | RMS [m] | Max. verdi [m] | $T_z$ [s] | Min. verdi [m] | $T_z$ [s] | Bølgelengde [m] | Fribord [m] |
|-----------------------|---------------|---------|----------------|-----------|----------------|-----------|-----------------|-------------|
| 1 Front senter        | X 16.9        | 2.74    | 4.153          | 5.5       | 1.728          | 9.4       | 56              | 2.035       |
|                       | Y 0.0         |         |                |           |                |           |                 |             |
|                       | Z 2.035       |         |                |           |                |           |                 |             |
| 2 Front hjørne babord | X 16.5        | 2.17    | 3.259          | 5.5       | 1.419          | 9.4       | 45              | 2.116       |
|                       | Y 8.0         |         |                |           |                |           |                 |             |
|                       | Z 2.116       |         |                |           |                |           |                 |             |
| 3 Babord senter       | X 0           | 1.87    | 2.506          | 5.5       | 1.403          | 9.4       | 25              | 1.532       |
|                       | Y 8.49        |         |                |           |                |           |                 |             |
|                       | Z 1.532       |         |                |           |                |           |                 |             |
| 4 Hekk hjørne babord  | x -15.0       | 3.56    | 5.323          | 5.5       | 2.205          | 9.4       | 40              | 1.041       |
|                       | y 8.49        |         |                |           |                |           |                 |             |
|                       | z 1.041       |         |                |           |                |           |                 |             |

|   |                            |   |       |      |       |     |      |     |    |       |
|---|----------------------------|---|-------|------|-------|-----|------|-----|----|-------|
| 6 | Hekk<br>hjørne<br>styrbord | x | -15.0 | 3.48 | 5.224 | 5.5 | 2.16 | 9.4 | 39 | 0.881 |
|   |                            | y | -8.49 |      |       |     |      |     |    |       |
|   |                            | z | 0.881 |      |       |     |      |     |    |       |

Tabell 42: Maksimum relativ bølgehøyde over dekk

| Punkt 1 | Punkt 2 | Punkt 3 | Punkt 4 | Punkt 5 | Punkt 6 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 2.118   | 1.143   | 0.974   | 4.28    |         | 4.34    |

Tabell 43: Minimum relativ bølgehøyde over dekk

| Punkt 1 | Punkt 2 | Punkt 3 | Punkt 4 | Punkt 5 | Punkt 6 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0       | 0       | 0       | 1.16    |         | 1.28    |

*Bølgeretning skråsjø (45 grader)*

Tabell 44: Globale bevegelser i nullpunktet til koordinatsystemet

| Frihetsgrad            | RMS   | Max. verdi | $T_z$ | $T_{z,resp}$ | Bølgelengde |
|------------------------|-------|------------|-------|--------------|-------------|
| Jag (surge) [m]        | 1.82  | 2.025      | 9.4   | 10.86        | 184         |
| Svai (sway) [m]        | 1.83  | 2.028      | 9.4   | 10.81        | 182         |
| Hiv (heave) [m]        | 3.24  | 3.254      | 8.2   | 9.09         | 129         |
| Rull (roll) [grader]   | 21.12 | 32.3       | 5.5   | 6.29         | 62          |
| Stamp (pitch) [grader] | 9.29  | 12.7       | 5.5   | 6.35         | 63          |
| Gir (yaw) [grader]     | 3.55  | 4.6        | 5.5   | 6.18         | 60          |

Tabell 45: Akselerasjoner i x, y, z retning for styrehuset

| Punkt | Koordinat [m] | Frihetsgrad | RMS [ $\frac{m}{s^2}$ ] | Max. verdi akselerasjon [ $\frac{m}{s^2}$ ] | $T_z$ [s] |     |
|-------|---------------|-------------|-------------------------|---|-----------|-----|
| 1     | X             | 10.36       | x                       | 0.95  | 1.27      | 5.5 |
|       | Y             | 0.0         | y                       | 2.22  | 2.92      | 5.5 |
|       | Z             | 6.714       | z                       | 3.57  | 3.80      | 5.5 |

Tabell 46: Relativ bølgehøyde over dekk

| Punkt |                     | Koordinat [m] |       | RMS [m] | Max. verdi [m] | $T_z$ [s] | Min. verdi [m] | $T_z$ [s] | Bølgelengde [m] | Fribord [m] |
|-------|---------------------|---------------|-------|---------|----------------|-----------|----------------|-----------|-----------------|-------------|
| 1     | Front senter        | X             | 16.9  | 1.57    | 2.34           | 5.5       | 1.12           | 9.4       | 42              | 2.035       |
|       |                     | Y             | 0.0   |         |                |           |                |           |                 |             |
|       |                     | Z             | 2.035 |         |                |           |                |           |                 |             |
| 2     | Front hjørne babord | X             | 16.5  | 2.97    | 4.66           | 5.5       | 1.87           | 9.4       | 60              | 2.116       |
|       |                     | Y             | 8.0   |         |                |           |                |           |                 |             |
|       |                     | Z             | 2.116 |         |                |           |                |           |                 |             |
| 3     | Babord senter       | X             | 0     | 2.60    | 3.87           | 5.5       | 1.76           | 9.4       | 54              | 1.532       |
|       |                     | Y             | 8.49  |         |                |           |                |           |                 |             |
|       |                     | Z             | 1.532 |         |                |           |                |           |                 |             |
| 4     | Hekk hjørne babord  | X             | -16.5 | 3.03    | 4.54           | 5.5       | 1.99           | 9.4       | 45              | 1.041       |
|       |                     | Y             | 8.0   |         |                |           |                |           |                 |             |
|       |                     | Z             | 1.041 |         |                |           |                |           |                 |             |

Tabell 47: Maksimum relativ bølgehøyde over dekk

| Punkt 1 | Punkt 2 | Punkt 3 | Punkt 4 | Punkt 5 | Punkt 6 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0.3     | 2.55    | 2.34    | 3.50    |         |         |

Tabell 48: Minimum relativ bølgehøyde over dekk

| Punkt 1 | Punkt 2 | Punkt 3 | Punkt 4 | Punkt 5 | Punkt 6 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0       | 0       | 0.23    | 0.95    |         |         |

## Bølgeretning sidesjø (90 grader)

Tabell 49: Globale bevegelser i nullpunktet til koordinatsystemet

| Frihetsgrad            | RMS         | Max. verdi  | $T_z$ | $T_{z,resp}$ | Bølgelengde |
|------------------------|-------------|-------------|-------|--------------|-------------|
| Jag (surge) [m]        | 0.08        | 0.11        | 5.5   | 5.66         | 50          |
| Svai (sway) [m]        | 2.74        | 2.943       | 9.4   | 10.58        | 175         |
| Hiv (heave) [m]        | 3.49        | 3.637       | 5.5   | 6.71         | 70          |
| Rull (roll) [grader]   | 37.58       | 61.7        | 5.5   | 6.25         | 61          |
| Stamp (pitch) [grader] | $\approx 0$ | $\approx 0$ |       |              |             |
| Gir (yaw) [grader]     | $\approx 0$ | $\approx 0$ |       |              |             |

Tabell 50: Akselerasjoner i x, y, z retning for styrehuset

| Punkt |          | Koordinat [m] |       | Frihetsgrad | RMS [ $\frac{m}{s^2}$ ] | Max. verdi akselerasjon [ $\frac{m}{s^2}$ ] | $T_z$ [s] |
|-------|----------|---------------|-------|-------------|-------------------------|---|-----------|
| 1     | Styrehus | X             | 10.36 | x           |                         |   |           |
|       |          | Y             | 0.0   | y           | 4.17                    | 5.94  | 5.5       |
|       |          | Z             | 6.714 | z           | 3.41                    | 3.49  | 5.8       |

Tabell 51: Relativ bølgehøyde over dekk

| Punkt |                     | Koordinat [m] |       | RMS [m] | Max. verdi [m] | $T_z$ [s] | Min. verdi [m] | $T_z$ [s] | Bølgelengde [m] | Fribord [m] |
|-------|---------------------|---------------|-------|---------|----------------|-----------|----------------|-----------|-----------------|-------------|
| 1     | Front senter        | X             | 16.9  | 1.58    | 2.14           | 5.5       | 1.21           | 9.4       | 21              | 2.035       |
|       |                     | Y             | 0.0   |         |                |           |                |           |                 |             |
|       |                     | Z             | 2.035 |         |                |           |                |           |                 |             |
| 2     | Front hjørne babord | X             | 16.5  | 4.85    | 7.46           | 5.5       | 3.06           | 9.4       | 56              | 2.116       |
|       |                     | Y             | 8.0   |         |                |           |                |           |                 |             |
|       |                     | Z             | 2.116 |         |                |           |                |           |                 |             |
| 3     | Babord senter       | X             | 0     | 4.80    | 7.45           | 5.5       | 3.01           | 9.4       | 58              | 1.532       |
|       |                     | Y             | 8.49  |         |                |           |                |           |                 |             |
|       |                     | Z             | 1.532 |         |                |           |                |           |                 |             |
| 4     | Hekk hjørne babord  | X             | -16.5 | 5.01    | 7.80           | 5.5       | 3.14           | 9.4       | 59              | 1.041       |
|       |                     | Y             | 8.0   |         |                |           |                |           |                 |             |
|       |                     | Z             | 1.041 |         |                |           |                |           |                 |             |



|   |             |   |       |      |      |     |      |     |    |       |
|---|-------------|---|-------|------|------|-----|------|-----|----|-------|
| 5 | Hekk senter | X | -16.9 | 1.94 | 2.74 | 5.5 | 1.37 | 9.4 | 29 | 0.891 |
|   |             | Y | 0     |      |      |     |      |     |    |       |
|   |             | Z | 0.891 |      |      |     |      |     |    |       |

Tabell 52: Maksimum relativ bølgehøyde over dekk

| Punkt 1 | Punkt 2 | Punkt 3 | Punkt 4 | Punkt 5 | Punkt 6 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0.10    | 5.34    | 5.92    | 6.76    | 1.85    |         |

Tabell 53: Minimum relativ bølgehøyde over dekk

| Punkt 1 | Punkt 2 | Punkt 3 | Punkt 4 | Punkt 5 | Punkt 6 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0       | 0.94    | 1.48    | 2.1     | 0.48    |         |

### Oppsummering av tilstand fullastet 0, 45 og 90 grader

#### Translasjoner

Flåten har størst respons i hhv. *Jag*, *svai* og *hiv* ved høye bølgeperioder og lange bølgelengder. For *jag* er det beregnet en maksimal respons på 2.764 [m] med en  $T_z$  på 9.4 [s]. Bølgeperioden som gir størst utslag er 11 [s] og møtende sjø [figur 39]. For *svai* er det beregnet en maksimal respons på 2.943 [m] med en  $T_z$  på 9.4 [s]. Bølgeperioden som gir størst utslag er 10.6 [s] og sidesjø [Tabell 49]. For *hiv* er det beregnet en maksimal respons på 3.637 [m] med en  $T_z$  på 5.5 [s]. Bølgeperioden som gir størst utslag er på 6.7 [s] og sidesjø [Tabell 49].

#### Rotasjoner

Flåten opplever størst respons i hhv. *Rull*, *stamp* og *gir* ved lave bølgeperioder og korte bølgelengder. For *rull* er det beregnet en RMS på 37.58 [grader] når  $T_z$  er 5.5 [s] og sidesjø [tabell 49]. I *Stamp* er det beregnet en RMS på 12.93 grader en  $T_z$  på 5.5 [s] og møtende sjø [Tabell 39]. For *gir* er det beregnet en RMS på 3.55 grader når  $T_z$  er 5.5 [s] og skråsjø [Tabell 44].

#### Akselerasjon i styrehuset

Den største RMS for horisontal akselerasjonen beregnet i styrehuset oppstår under sidesjø og  $T_z$  på 5.5 [s]. Denne akselerasjonen er beregnet til  $4.17 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$  (0.42g) i y-retning [tabell 50]. For akselerasjon i vertikal retning oppstår den største beregnede RMS verdien på  $3.73 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$  (0.38g) i z-retning under møtende sjø og  $T_z$  er 5.5 [s] [Tabell 40]. kriteriene for tungt, manuelt arbeid om bord førflåte er ifølge NORDFORSK er 0.15g [4].

### Relativ bølgehøyde

Det er beregnet vannoverslag i alle tre bølgeretninger når  $T_z$  er på 5.5 [s] som er den laveste  $T_z$  verdien for lokasjon 2 og når  $T_z$  er 9.4 [s] som er den høyeste  $T_z$  verdien for lokasjonen 2. Den største beregnede verdien for vann over dekk når  $T_z$  er 5.5 [s] er 6.8 [m] og oppstår i punkt 4 under møtende sjø. Største beregnede vann over dekk når  $T_z$  er 9.4 [s], er 2.1 [m] i punktet som er plassert på hjørnet av hekken babord.

#### 4.2.4 Hs = 5.5 [m] lettskips

##### Bølgeretning møtende sjø (0 grader)

Tabell 54: Globale bevegelser i nullpunktet til koordinatsystemet

| Frihetsgrad            | RMS   | Max. verdi | $T_z$ | $T_{resp}$ | Bølgelengde |
|------------------------|-------|------------|-------|------------|-------------|
| Jag (surge) [m]        | 2.947 | 3.371      | 11.4  | 12.785     | 255         |
| Svai (sway) [m]        | ≈ 0   | ≈ 0        |       |            |             |
| Hiv (heave) [m]        | 4.713 | 4.848      | 11.4  | 12.611     | 248         |
| Rull (roll) [grader]   | ≈ 0   | ≈ 0        |       |            |             |
| Stamp (pitch) [grader] | 13.06 | 17.01      | 7.5   | 6.91       | 75          |
| Gir (yaw) [grader]     | ≈ 0   | ≈ 0        |       |            |             |

Tabell 55: Akselerasjoner i x, y, z retning for styrehuset

| Punkt | Koordinat [m] | Frihetsgrad | RMS [ $\frac{m}{s^2}$ ] | Max. verdi [ $\frac{m}{s^2}$ ] | $T_z$ [s] |     |
|-------|---------------|-------------|-------------------------|--------------------------------|-----------|-----|
| 1     | X             | 10.36       | x                       | 1.40                           | 1.74      | 7.5 |
|       | Y             | 0.0         | y                       |                                |           |     |
|       | Z             | 6.714       | z                       | 2.68                           | 3.56      | 7.5 |

Tabell 56: Relativ bølgehøyde over dekk

| Punkt | Koordinat [m] | RMS [m] | Max. verdi [m] | $T_z$ [s] | min. verdi [m] | $T_z$ [s] | Bølgelengde [m] | Fribord [m] |       |
|-------|---------------|---------|----------------|-----------|----------------|-----------|-----------------|-------------|-------|
| 1     | X             | 16.9    | 2.60           | 3.48      | 7.5            | 1.96      | 11.4            | 52          | 2.704 |
|       | Y             | 0.0     |                |           |                |           |                 |             |       |
|       | Z             | 2.704   |                |           |                |           |                 |             |       |
| 2     | X             | 16.5    | 2.14           | 2.76      | 7.5            | 1.73      | 11.4            | 45          | 2.704 |
|       | Y             | 8.0     |                |           |                |           |                 |             |       |
|       | Z             | 2.704   |                |           |                |           |                 |             |       |

|   |               |   |       |      |      |     |      |      |    |       |
|---|---------------|---|-------|------|------|-----|------|------|----|-------|
| 3 | Babord senter | X | 0     | 2.18 | 2.73 | 7.5 | 1.92 | 11.4 | 42 | 2.704 |
|   |               | Y | 8.49  |      |      |     |      |      |    |       |
|   |               | Z | 2.704 |      |      |     |      |      |    |       |

Tabell 57: Maksimum relativ bølgehøyde over dekk

| Punkt 1 | Punkt 2 | Punkt 3 | Punkt 4 | Punkt 5 | Punkt 6 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0.776   | 0.056   | 0.026   |         |         |         |

Tabell 58: Minimum relativ bølgehøyde over dekk

| Punkt 1 | Punkt 2 | Punkt 3 | Punkt 4 | Punkt 5 | Punkt 6 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0       | 0       | 0       |         |         |         |

*Bølgeretning skråsjø (45 grader)*

Tabell 59: Globale bevegelser i nullpunktet til koordinatsystemet

| Frihetsgrad            | RMS   | Max. verdi | $T_z$ | $T_{resp}$ | Bølgelengde |
|------------------------|-------|------------|-------|------------|-------------|
| Jag (surge) [m]        | 3.36  | 3.446      | 11.4  | 12.528     | 245         |
| Svai (sway) [m]        | 3.37  | 3.442      | 11.4  | 12.497     | 244         |
| Hiv (heave) [m]        | 4.90  | 4.951      | 11.1  | 12.035     | 226         |
| Rull (roll) [grader]   | 11.88 | 15.08      | 7.5   | 6.246      | 61          |
| Stamp (pitch) [grader] | 10.03 | 13.24      | 7.5   | 5.562      | 48          |
| Gir (yaw) [grader]     | 4.14  | 5.2        | 7.5   | 7.136      | 79          |

Tabell 60: Akselerasjoner i x, y, z retning for styrehuset

| Punkt | Koordinat [m] | Frihetsgrad | RMS [ $\frac{m}{s^2}$ ] | Max. verdi [ $\frac{m}{s^2}$ ] | $T_z$ [s] |     |
|-------|---------------|-------------|-------------------------|--------------------------------|-----------|-----|
| 1     | X             | 10.36       | x                       | 1.03                           | 1.29      | 7.5 |
|       | Y             | 0.0         | y                       | 1.13                           | 1.49      | 7.5 |
|       | Z             | 6.714       | z                       | 2.73                           | 3.65      | 7.5 |

Tabell 61: Relativ bølgehøyde over dekk

| Punkt |                     | Koordinat [m] |       | RMS [m] | Max. verdi [m] | $T_z$ [s] | min. verdi [m] | $T_z$ [s] | Bølgelengde [m] | fribord [m] |
|-------|---------------------|---------------|-------|---------|----------------|-----------|----------------|-----------|-----------------|-------------|
| 1     | Front senter        | X             | 16.9  | 1.70    | 2.11           | 7.4       | 1.56           | 11.4      | 42              | 2.704       |
|       |                     | Y             | 0.0   |         |                |           |                |           |                 |             |
|       |                     | Z             | 2.704 |         |                |           |                |           |                 |             |
| 2     | Front hjørne babord | X             | 16.5  | 3.16    | 4.31           | 7.5       | 2.29           | 11.4      | 50              | 2.704       |
|       |                     | Y             | 8.0   |         |                |           |                |           |                 |             |
|       |                     | Z             | 2.704 |         |                |           |                |           |                 |             |
| 3     | Babord senter       | X             | 0     | 1.58    | 1.66           | 7.5       | 1.53           | 11.4      | 57              | 2.704       |
|       |                     | Y             | 8.49  |         |                |           |                |           |                 |             |
|       |                     | Z             | 2.704 |         |                |           |                |           |                 |             |
| 4     | Hekk hjørne babord  | X             | -16.5 | 2.00    | 2.40           | 7.5       | 1.75           | 11.4      | 25              | 2.704       |
|       |                     | Y             | 8.0   |         |                |           |                |           |                 |             |
|       |                     | Z             | 2.704 |         |                |           |                |           |                 |             |

Tabell 62: Maksimum relativ bølgehøyde over dekk

| Punkt 1 | Punkt 2 | Punkt 3 | Punkt 4 | Punkt 5 | Punkt 6 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0       | 1.606   | 0       | 0       |         |         |

Tabell 63: Minimum relativ bølgehøyde over dekk

| Punkt 1 | Punkt 2 | Punkt 3 | Punkt 4 | Punkt 5 | Punkt 6 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0       | 0       | 0       | 0       |         |         |

*Bølgeretning sidesjø (90 grader)*

Tabell 64: Globale bevegelser i nullpunktet til koordinatsystemet

| Frihetsgrad            | RMS         | Max. verdi  | $T_z$ | $T_{resp}$ | Bølgelengde |
|------------------------|-------------|-------------|-------|------------|-------------|
| Jag (surge) [m]        | $\approx 0$ | $\approx 0$ |       |            |             |
| Svai (sway) [m]        | 4.913       | 4.962       | 11.1  | 11.905     | 221         |
| Hiv (heave) [m]        | 5.119       | 5.157       | 7.5   | 8.307      | 108         |
| Rull (roll) [grader]   | 24.23       | 33.64       | 7.5   | 5.588      | 49          |
| Stamp (pitch) [grader] | $\approx 0$ | $\approx 0$ |       |            |             |
| Gir (yaw) [grader]     | $\approx 0$ | $\approx 0$ |       |            |             |

Tabell 65: Akselerasjoner i x, y, z retning for styrehuset

| Punkt | Koordinat [m] | Frihetsgrad | RMS [ $\frac{m}{s^2}$ ] | Max. verdi [ $\frac{m}{s^2}$ ] | $T_z$ [s] |     |
|-------|---------------|-------------|-------------------------|--------------------------------|-----------|-----|
| 1     | Styrehus      | X 10.36     | x                       |                                |           |     |
|       |               | Y 0.0       | y                       | 3.04                           | 4.24      | 7.5 |
|       |               | Z 6.714     | z                       | 2.54                           | 3.37      | 7.5 |

Tabell 66: Relativ bølgehøyde over dekk

| Punkt | Koordinat [m]       | RMS [m] | Max. verdi [m] | $T_z$ [s] | min. verdi [m] | $T_z$ [s] | Bølgelengde [m] | Fribord [m] |       |
|-------|---------------------|---------|----------------|-----------|----------------|-----------|-----------------|-------------|-------|
| 2     | Front hjørne babord | X 16.5  | 2.50           | 3.35      | 7.5            | 2.0       | 11.4            | 39          | 2.704 |
|       |                     | Y 8.0   |                |           |                |           |                 |             |       |
|       |                     | Z 2.704 |                |           |                |           |                 |             |       |
| 3     | Babord senter       | X 0     | 2.66           | 3.54      | 7.5            | 2.04      | 11.4            | 43          | 2.704 |
|       |                     | Y 8.49  |                |           |                |           |                 |             |       |
|       |                     | Z 2.704 |                |           |                |           |                 |             |       |
| 4     | Hekk hjørne babord  | X -16.5 | 2.56           | 3.35      | 7.5            | 2.0       | 11.4            | 39          | 2.704 |
|       |                     | Y 8.0   |                |           |                |           |                 |             |       |
|       |                     | Z 2.704 |                |           |                |           |                 |             |       |

Tabell 67: Maksimum relativ bølgehøyde over dekk

| Punkt 1 | Punkt 2 | Punkt 3 | Punkt 4 | Punkt 5 | Punkt 6 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|         | 0.646   | 0.836   | 0.646   |         |         |

Tabell 68: Minimum relativ bølgehøyde over dekk

| Punkt 1 | Punkt 2 | Punkt 3 | Punkt 4 | Punkt 5 | Punkt 6 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|         | 0       | 0       | 0       |         |         |

### Oppsummering tilstand lettskips $H_s = 5.5$ [m], bølgeklasse E, 0, 45 og 90 grader

#### Translasjoner

I likhet med resultatene fra  $H_s = 3.5$  [m] så vil flåten få størst respons for sine translasjoner ved høye bølgeperioder og lange bølgelengder. Bølgeperioden som gir størst utslag i x-retning er 12.8 [s] ved møtende sjø [Tabell 54]. Maksimalverdien for *jag* er beregnet til 4.769 [m], med en  $T_z$  på 11.4 [s]. For *svai* er det beregnet en maksimal verdi på 4.962 [m] med en  $T_z$  på 11.1 [s]. Bølgeperioden som gir størst utslag i y-retning er på 11.9 [s] og sidesjø (90 grader) [Tabell 64]. For den siste translasjonen, *hiv*, er det beregnet en maksimalverdi på 5.157 [m] med en  $T_z$  på 7.5 [s], som er en vesentlig lavere  $T_z$  enn for *jag* og *svai*. Bølgeperioden som gir størst utslag i z-retning er 8.3 [s] og sidesjø [Tabell 64].

#### Rotasjoner

Den største responsen for flåtens rotasjoner kommer ved relativt lave bølgeperioder og korte bølgelengder. For *rull* er det beregnet en maksimalverdi på 33.64 grader med en  $T_z$  på 7.5 [s] ved sidesjø [Tabell 64]. RMS verdien for *rull* overskrider kriteriene til NORDFORSK ved skråsjø [Tabell 59] og sidesjø [Tabell 64] [4]. Bølgeperioden som gir størst utslag på rotasjon om x-aksen er på 5.6 [s] i bølger fra 90 grader [Tabell 64]. For *stamp* er den største RMS-verdien på 13 grader med en  $T_z$  på 7.5 [s]. Størst respons for rotasjon om y-aksen kommer ved en bølgeperiode på 6.9 [s] og møtende sjø (0 grader) [Tabell 54]. *Gir* er den rotasjonen med minst utslag på respons, og maksimal RMS som oppstår er på 4.1 grader med en  $T_z$  på 7.5 [s]. Størst utslag på rotasjon om z-aksen kommer ved bølger fra 45 grader (skråsjø) [Tabell 59] med en bølgeperiode på 7.1 [s].

#### Akselerasjoner i styrhuset

Flåtens største RMS for horisontal akselerasjon i styrhuset oppstår under sidesjø (90 grader) [Tabell 65]. Denne er beregnet til  $0.31g$  i y-retning når sjøtilstanden har en  $T_z$  på 7.5 [s]. Største RMS for vertikal akselerasjon oppstår under skråsjø (45 grader) [Tabell 60]. Denne er beregnet til  $0.28g$  med en  $T_z$  på 7.5 [s]. Disse verdiene er vesentlig høyere enn NORDFORSK's kriterier for tungt manuelt arbeid [4].

### Relativ bølgehøyde

Det er beregnet overslag av vann over dekk for alle tre bølgeretningene når  $T_z$  er på 7.5 [s]. Den største beregnede verdien for overslag av vann oppstår i punkt 2 ved skråsjø og en  $T_z$  på 7.5 [s] [Tabell 62].

#### 4.2.5 $H_s = 5.5$ [m] fullastet

##### Bølgeretning møtende sjø (0 grader)

Tabell 69: Globale bevegelser i nullpunktet til koordinatsystemet

| Frihetsgrad            | RMS         | Max. verdi  | $T_z$ | $T_{resp}$ | Bølgelengde |
|------------------------|-------------|-------------|-------|------------|-------------|
| Jag (surge) [m]        | 4.309       | 4.580       | 11.4  | 12.967     | 263         |
| Svai (sway) [m]        | 0.017       | 0.024       | 7.5   | 6.127      | 59          |
| Hiv (heave) [m]        | 4.887       | 4.943       | 11.1  | 11.223     | 197         |
| Rull (roll) [grader]   | 1.092       | 1.527       | 7.5   | 6.164      | 59          |
| Stamp (pitch) [grader] | 14.543      | 19.157      | 7.5   | 6.938      | 75          |
| Gir (yaw) [grader]     | $\approx 0$ | $\approx 0$ |       |            |             |

Tabell 70: Akselerasjoner i x, y, z retning for styrehuset

| Punkt | Koordinat [m] | Frihetsgrad | RMS [ $\frac{m}{s^2}$ ] | Max. verdi [ $\frac{m}{s^2}$ ] | $T_z$ [s] |      |     |
|-------|---------------|-------------|-------------------------|--------------------------------|-----------|------|-----|
| 1     | Styrehus      | X           | 10.36                   | x                              | 1.53      | 1.96 | 7.5 |
|       |               | Y           | 0.0                     | y                              | 0.11      | 0.16 | 7.5 |
|       |               | Z           | 6.714                   | z                              | 5.49      | 5.79 | 7.5 |

Tabell 71: Relativ bølgehøyde over dekk

| Punkt | Koordinat [m]       | RMS [m] | Max. verdi [m] | $T_z$ [s] | Min. verdi [m] | $T_z$ [s] | Bølgelengde [m] | Fribord [m] |    |       |
|-------|---------------------|---------|----------------|-----------|----------------|-----------|-----------------|-------------|----|-------|
| 1     | Front senter        | X       | 16.9           | 2.85      | 3.84           | 7.5       | 2.11            | 11.4        | 58 | 2.035 |
|       |                     | Y       | 0.0            |           |                |           |                 |             |    |       |
|       |                     | Z       | 2.035          |           |                |           |                 |             |    |       |
| 2     | Front hjørne babord | X       | 16.5           | 2.33      | 3.05           | 7.5       | 1.83            | 11.4        | 48 | 2.115 |
|       |                     | Y       | 8.0            |           |                |           |                 |             |    |       |
|       |                     | Z       | 2.115          |           |                |           |                 |             |    |       |
| 3     | Babord senter       | X       | 0              | 2.26      | 2.75           | 7.5       | 1.91            | 11.4        | 37 | 1.532 |
|       |                     | Y       | 8.49           |           |                |           |                 |             |    |       |
|       |                     | Z       | 1.532          |           |                |           |                 |             |    |       |

Tabell 72: Maksimum relativ bølgehøyde over dekk

| Punkt 1 | Punkt 2 | Punkt 3 |
|---------|---------|---------|
| 1.805   | 0.935   | 1.218   |

Tabell 73: Minimum relativ bølgehøyde over dekk

| Punkt 1 | Punkt 2 | Punkt 3 |
|---------|---------|---------|
| 0.075   | 0       | 0.378   |

*Bølgeretning skråsjø (45 grader)*

Tabell 74: Globale bevegelser i nullpunktet til koordinatsystemet

| Frihetsgrad            | RMS    | Max. verdi | $T_z$ | $T_{resp}$ | Bølgelengde |
|------------------------|--------|------------|-------|------------|-------------|
| Jag (surge) [m]        | 3.163  | 3.304      | 11.4  | 12.759     | 254         |
| Svai (sway) [m]        | 3.168  | 3.303      | 11.4  | 12.716     | 252         |
| Hiv (heave) [m]        | 5.090  | 5.115      | 7.8   | 8.745      | 119         |
| Rull (roll) [grader]   | 22.034 | 30.350     | 7.5   | 6.408      | 64          |
| Stamp (pitch) [grader] | 10.412 | 13.740     | 7.5   | 6.923      | 75          |
| Gir (yaw) [grader]     | 4.21   | 5.382      | 7.5   | 7.214      | 81          |

Tabell 75: Akselerasjoner i x, y, z retning for styrehuset

| Punkt | Koordinat [m] | Frihetsgrad | RMS [ $\frac{m}{s^2}$ ] | Max. verdi [ $\frac{m}{s^2}$ ] | $T_z$ [s] |      |     |
|-------|---------------|-------------|-------------------------|--------------------------------|-----------|------|-----|
| 1     | Styrehus      | X           | 10.36                   | x                              | 1.10      | 1.42 | 7.5 |
|       |               | Y           | 0.0                     | y                              | 3.11      | 3.30 | 7.5 |
|       |               | Z           | 6.714                   | z                              | 5.37      | 5.58 | 7.5 |



Tabell 76: Relativ bølgehøyde over dekk

| Punkt |                     | Koordinat [m] |       | RMS [m] | Max. verdi [m] | $T_z$ [s] | min. verdi [m] | $T_z$ [s] | Bølgelengde [m] | Fribord [m] |
|-------|---------------------|---------------|-------|---------|----------------|-----------|----------------|-----------|-----------------|-------------|
| 1     | Front senter        | X             | 16.9  | 1.82    | 2.21           | 7.5       | 1.58           | 11.4      | 46              | 2.035       |
|       |                     | Y             | 0.0   |         |                |           |                |           |                 |             |
|       |                     | Z             | 2.035 |         |                |           |                |           |                 |             |
| 2     | Front hjørne babord | X             | 16.5  | 3.08    | 4.16           | 7.5       | 2.26           | 11.4      | 61              | 2.115       |
|       |                     | Y             | 8.0   |         |                |           |                |           |                 |             |
|       |                     | Z             | 2.115 |         |                |           |                |           |                 |             |
| 3     | Babord senter       | X             | 0     | 2.88    | 3.76           | 7.5       | 2.20           | 11.4      | 57              | 1.532       |
|       |                     | Y             | 8.49  |         |                |           |                |           |                 |             |
|       |                     | Z             | 1.532 |         |                |           |                |           |                 |             |
| 4     | Hekk hjørne babord  | X             | -15   | 3.27    | 4.36           | 7.5       | 2.43           | 11.4      | 48              | 1.041       |
|       |                     | Y             | 8.49  |         |                |           |                |           |                 |             |
|       |                     | Z             | 1.041 |         |                |           |                |           |                 |             |

Tabell 77: Maksimum relativ bølgehøyde over dekk

| Punkt 1 | Punkt 2 | Punkt 3 | Punkt 4 | Punkt 5 | Punkt 6 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0.175   | 2.045   | 2.228   | 3.319   |         |         |

Tabell 78: Minimum relativ bølgehøyde over dekk

| Punkt 1 | Punkt 2 | Punkt 3 | Punkt 4 | Punkt 5 | Punkt 6 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0       | 0.145   | 0.668   | 1.389   |         |         |

*Bølgeretning sidesjø (90 grader)*

Tabell 79: Globale bevegelser i nullpunktet til koordinatsystemet

| Frihetsgrad            | RMS    | Max. verdi | $T_z$ [s] | $T_{resp}$ [s] | Bølgelengde [m] |
|------------------------|--------|------------|-----------|----------------|-----------------|
| Jag (surge) [m]        | 0.077  | 0.108      | 7.5       | 5.717          | 51              |
| Svai (sway) [m]        | 4.604  | 4.740      | 11.4      | 12.504         | 244             |
| Hiv (heave) [m]        | 5.296  | 5.458      | 7.5       | 8.260          | 107             |
| Rull (roll) [grader]   | 41.492 | 57.525     | 7.5       | 6.311          | 62              |
| Stamp (pitch) [grader] | 2.058  | 2.899      | 7.5       | 5.801          | 53              |
| Gir (yaw) [grader]     | 1.170  | 1.609      | 7.5       | 6.407          | 64              |

Tabell 80: Akselerasjoner i x, y, z retning for styrehuset

| Punkt | Koordinat [m] | Frihetsgrad | RMS $\left[\frac{m}{s^2}\right]$ | Max. verdi $\left[\frac{m}{s^2}\right]$ | $T_z$ [s] |     |
|-------|---------------|-------------|----------------------------------|---|-----------|-----|
| 1     | X             | 10.36       | x                                | 0.29                                    | 0.41      | 7.5 |
|       | Y             | 0.0         | y                                | 5.22                                    | 6.1       | 7.5 |
|       | Z             | 6.714       | z                                | 5.24                                    | 5.36      | 7.5 |

Tabell 81: Relativ bølgehøyde over dekk

| Punkt | Koordinat [m] | RMS [m] | Max. verdi [m] | $T_z$ [s] | Min. verdi [m] | $T_z$ [s] | Bølgelengde [m] | Fribord [m] |       |
|-------|---------------|---------|----------------|-----------|----------------|-----------|-----------------|-------------|-------|
| 1     | X             | 16.9    | 1.949          | 2.30      | 7.5            | 1.72      | 11.4            | 30          | 2.035 |
|       | Y             | 0.0     |                |           |                |           |                 |             |       |
|       | Z             | 2.035   |                |           |                |           |                 |             |       |
| 2     | X             | 16.5    | 5.06           | 6.95      | 7.5            | 3.51      | 11.4            | 56          | 2.115 |
|       | Y             | 8.0     |                |           |                |           |                 |             |       |
|       | Z             | 2.115   |                |           |                |           |                 |             |       |
| 3     | X             | 0       | 4.98           | 6.84      | 7.5            | 3.44      | 11.4            | 58          | 1.532 |
|       | Y             | 8.49    |                |           |                |           |                 |             |       |
|       | Z             | 1.532   |                |           |                |           |                 |             |       |
| 4     | X             | -15     | 5.19           | 7.14      | 7.5            | 3.58      | 11.4            | 59          | 1.041 |
|       | Y             | 8.49    |                |           |                |           |                 |             |       |
|       | Z             | 1.041   |                |           |                |           |                 |             |       |
| 5     | X             | -16.9   | 2.24           | 2.80      | 7.5            | 1.85      | 11.4            | 36          | 0.891 |
|       | Y             | 0       |                |           |                |           |                 |             |       |
|       | Z             | 0.891   |                |           |                |           |                 |             |       |

Tabell 82: Maksimum relativ bølgehøyde over dekk

| Punkt 1 | Punkt 2 | Punkt 3 | Punkt 4 | Punkt 5 | Punkt 6 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0.265   | 4.835   | 5.308   | 6.1     | 1.909   |         |

Tabell 83: Minimum relativ bølgehøyde over dekk

| Punkt 1 | Punkt 2 | Punkt 3 | Punkt 4 | Punkt 5 | Punkt 6 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0       | 1.395   | 1.908   | 2.539   | 0.959   |         |

*Oppsummering tilstand fullastet  $H_s = 5.5$  [m]. 0, 45 og 90 grader*

*Translasjoner*

Det er relativt høye bølgeperioder og lang bølgelengde som gir størst utslag for denne lastekondisjonen. Ved møtende sjø (0 grader) gir kort bølgelengde og lav bølgeperiode størst utslag for *svai*, men utslaget er så lite (0.024 [m]) at det ikke er av betydning [Tabell 69]. Det samme gjelder for *jag* ved sidesjø (90 grader) [Tabell 79]. Bølgeperioden som gir størst utslag i x-retning er på ca 13 [s] ved møtende sjø (0 grader) [Tabell 69]. Maksimalverdien for *jag* er beregnet til 4.578 [m] med en  $T_z$  på 11.4 [s]. For *svai* er maksimalverdien beregnet til 4.74 [m] med en  $T_z$  på 11.4 [s]. Bølgeperioden som gir størst utslag i y-retning er på 12.5 [s] ved sidesjø (90 grader) [Tabell 79]. Maksimalverdien i *hiv* er på 5.458 [m] med en  $T_z$  på 7.5 [s], som er en vesentlig kortere nuloppkrysningsperiode enn for *jag* og *svai*. Bølgeperioden som gir størst utslag i z-retningen er på 8.3 [s] ved sidesjø (90 grader) [Tabell 79].

*Rotasjoner*

Igjen er det størst respons for rotasjoner ved relativt lave bølgeperioder og korte bølgelengder. For *rull* er det beregnet størst RMS på 41.5 grader med en  $T_z$  på 7.5 [s] [Tabell 79]. RMS verdien for *rull* overskrider kriteriene til NORDFORSK for tungt manuelt arbeid med en stor margin [4]. Størst utslag for rotasjon om x-aksen kommer ved en bølgeperiode på 6.3 [s] ved sidesjø (90 grader) [Tabell 79]. Maksimal RMS for *stamp* er på omtrent 14.5 grader med en  $T_z$  på 7.5 [s]. Bølgeperioden som gir størst respons for rotasjon om y-aksen er på ca 6.9 [s] ved møtende sjø (0 grader) [Tabell 69]. Igjen så er det lav respons for *gir* med størst RMS på omtrent 4.2 [m] og  $T_z = 7.5$  [s]. Den største responsen for rotasjon om z-aksen kommer ved en bølgeperiode på 7.2 [s] ved skråsjø (45 grader) [Tabell 74].

*Akselerasjoner i styrhus*

Flåtens største horisontale RMS for akselerasjon i styrhuset oppstår i y-retningen ved sidesjø (90 grader) [Tabell 80]. Denne akselerasjonen oppstår når sjøtilstanden har en  $T_z$  på 7.5 [s] og er beregnet til 0.53 *g*. Størst vertikal RMS for akselerasjon i styrhuset er beregnet til å være 0.56 *g* med en  $T_z$  på 7.5 [s] i møtende sjø (0 grader) [Tabell 70]. Disse verdiene overskrider NORDFORSK sine kriterier for hardt manuelt arbeid [4].

### *Relativ bølgehøyde*

Igjen er det beregnet overslag av vann i alle tre bølgeretninger når  $T_z$  er på 7.5 [s]. Den største beregnede verdien for overslag er ved sidesjø og oppstår i punkt 4 [Tabell 82], som er i hjørnet på hekken, babord side. Denne verdien er på 6.1 [m] med en  $T_z$  på 7.5 [s]. Minimumsverdien for overslag av vann oppstår når  $T_z$  er på 11.4 [s], men det oppstår overslag av vann over dekk for nesten samtlige punkt og ved alle bølgeretninger (0, 45, 90 [grader]). Grunnen til de store relative bølgehøydene skyldes mest sannsynlig at bølgene og flåten er i motfase. Dette vil diskuteres mer i diskusjonsdelen.

## 5.0 Diskusjon

Gjennom numerisk analyse ønsket vi å undersøke om flåtens begrensede bevegelser grunnet høy egenvekt vil variere i takt med bølgehøyde, bølgeperiode og bølgeretning. Samtidig å undersøke i hvor stor grad av grønn sjø som vil kunne oppstå i bølgeklasse E ( $H_s > 3$  [m]) og hvilke tiltak som kan innføres for å trygge arbeidsforhold om bord på flåten.

Denne rapporten tar for seg en hydrodynamisk analyse av SalMar fôrflåte, samt å sammenligne resultater med tidligere forskning utført av Sintef. Selv om det er gunstig å sammenligne med tidligere forskning, kan det være noe usikkerhet på grunn av forskjellene på flåtene. Disse forskjellene omhandler geometri, vekt og tyngdepunkt blant annet. I tillegg er flåten Sintef har forsket på skrog av stål, mens i dette prosjektet analyseres det på en flåte med betongskrog. Det er tatt en fullstendig analyse av SalMar flåten med signifikant bølgehøyde på 3.5 og 5.5 [m] i lastekondisjon lettskips og fullastet. Det kunne vært interessant å gjennomføre analyse av flere lasttilstander, men vi valgt å se på tilstandene med størst og minst fribord.

Det må også nevnes at det ikke blitt gjennomført en fortøyningsanalyse av SalMar i forbindelse med denne rapporten, og av den grunn fant vi det nødvendig å nevne noen feilkilder dette medfølger. Om SalMar skulle vært analysert i fortøyd tilstand ville egenperiodene mest sannsynlig vært ulike fra det de er uten. Fortøyningen ville nok dempet store deler av rotasjonene og translasjonene i flåten (spesielt i jag og svai). Flåten vil følge bølgene mer i alle frihetsgrader og drifte mer som følge av bølgenes drift kreftene. I noen av resultatene oppstår det unaturlig store vannoverslag og rotasjoner. Spesielt når nullkryssningsperioden er lik egenperioden til flåten (Rundt 6 [s]). I Oppsummeringen av tilstand fullastet 0, 45 og 90 grader ( $H_s = 3.5$  [m]) er det beregnet maksimum relativ bølgehøyde over dekk på 6.8 [m]. Det resultatene ikke sier noe om er det om flåten og bølgene er i motfase eller medfase. Det skal også nevnes at punktet der dette oppsto er lokalisert 1 [m] fra hekken og at bølgeretningen er møtende sjø, det vil si at bølgen er på vei bort fra konstruksjonen.

## 6.0 Konklusjon

Problemstillingen i denne rapporten handler om hvorvidt flåtens begrensede bevegelser vil variere i takt med bølgeperiode, bølgehøyde og bølgeretning. Det skulle også undersøkes om det ville oppstå grønn sjø og eventuelt hvor stor eksponering av dette. I tillegg skulle det gjøres rede for tiltak som burde innføres for å trygge arbeidsforhold om bord.

Når en forflåte skal sjøsettes på en lokasjon er det essensielt at det utføres en lokalitetsundersøkelse. Fra resultatene kan man se at på lokasjoner med stor sjanse for bølgeperioder i nærheten eller lik egenperioden til flåten vil store translasjoner, rotasjoner, akselerasjoner og vann over dekk kunne oppstå. Flåten vil følge overflatehevingen relativt bra til tross for sin høye egenvekt, men for de fleste sjøtilstander vil ikke flåten oppfylle kriteriene til NORDFORSK om maks laterale og vertikale akselerasjoner i styrehus.

Basert på resultater kan det foreslås følgende tiltak for å trygge arbeidsforholdene om bord:

- Dører i nærheten av utsatte punkt må være vanntett. I tillegg bør dørkarmen være så høy som mulig innenfor gjeldende krav.
- Det bør investeres i sensorer som monitorerer flåtens RMS for vertikale og laterale akselerasjoner for å kunne få en forståelse om hvorvidt det er forsvarlig å arbeide på en flåte plassert på slike utsatte lokasjoner.
- Det bør plasseres rekkverk der det er mulig å montere dette på flåten.

## 7.0 Videre arbeid

Denne rapporten tar for seg hydrodynamiske og hydrostatiske beregninger av SalMar's forflåte. Forflåten er modellert og testet for ulike sjøtilstander og lastekondisjoner der flåten ikke har noen begrensninger for bevegelser foruten dens hydrodynamiske egenskaper. Ved å videre se på slike beregninger med fortøyning på flåten kan det vurderes hvor mye effekt dette har på bevegelsene. Fortøyning er vanlig praksis å ha på slike forflåter, og det kan derfor anbefales å forske videre på dette. Videre ut av denne problemstillingen kunne det vært interessant å se på en spesifikk lokasjon hvor man kunne benyttet enda mer av NS9415.

På bakgrunn av resultatene bør NS9415 oppdateres med tanke på mer ekstreme sjøtilstander. Standarden bør komme i en oppdatert utgave hvor også arbeidsforhold om bord blir inkludert. NS9415 er opprettet for å hindre rømning av fisk, men visst personalet om bord skulle ende i ulykke vil denne risikoen for rømning øke drastisk.

## Tabell liste

|   |    |
|---|----|
| Tabell 1: Lokalitetsklasser – klassifikasjon av lokalitet på bakgrunn av signifikant bølgehøyde ..... | 3  |
| Tabell 2: Lokalitetsklasser – klassifikasjon av lokalitet på bakgrunn av strømshastighet .....        | 4  |
| Tabell 3: Fribordskrav i forhold til bølgekategori i tabell 1 .....                                   | 5  |
| Tabell 4: Stabilitetskrav intakt.....   | 5  |
| Tabell 5: Oversikt av vekt og plassering .....  | 7  |
| Tabell 6: Oversikt over de tre ulike lokasjonene og tilhørende sjøtilstander .....                    | 21 |
| Tabell 7: Lastkondisjoner SalMar .....  | 27 |
| Tabell 8: Kommentarer lettskips kondisjon.....  | 28 |
| Tabell 9: Kommentarer fullastet kondisjon .....   | 29 |
| Tabell 10: Fribordskrav [12] .....  | 30 |
| Tabell 11: Resultat av SalMar’s fribord ihht krav .....   | 30 |
| Tabell 12: NORDFORSK’s kriterier for akselerasjon [4] .....   | 32 |
| Tabell 13: Stabilitetskrav og resultater .....  | 33 |
| Tabell 14: resultat stabilitetskrav lettskips.....  | 33 |
| Tabell 15: Globale bevegelser i nullpunktet til koordinatsystemet Sintef og SalMar flåte .....        | 35 |
| Tabell 16: Akselerasjon i x, y, z retning for punkt i baug. Sintef flåte og SalMar flåte .....        | 35 |
| Tabell 17: Maksimum relativ bølgehøyde over dekk SalMar flåte og Sintef flåte.....                    | 35 |
| Tabell 18: Globale bevegelser i nullpunktet til koordinatsystemet .....                               | 36 |
| Tabell 19: Akselerasjon i x, y, z retning for punkt i baug. Sintef flåte. ....                        | 36 |
| Tabell 20: Maksimum relativ bølgehøyde over dekk, SalMar flåte og Sintef flåte.....                   | 36 |
| Tabell 21: Globale bevegelser i nullpunktet til koordinatsystemet .....                               | 37 |
| Tabell 22: Akselerasjon i x, y, z retning for punkt i baug. Sintef flåte. ....                        | 37 |
| Tabell 23: Maksimum relativ bølgehøyde over dekk, SalMar flåte og Sintef flåte.....                   | 37 |
| Tabell 24: Globale bevegelser i nullpunktet til koordinatsystemet .....                               | 40 |
| Tabell 25: Akselerasjoner i x, y, z retning for styrehuset .....                                      | 40 |
| Tabell 26: Relativ bølgehøyde over dekk .....   | 40 |
| Tabell 27: Maksimum relativ bølgehøyde over dekk .....  | 40 |
| Tabell 28: Minimum relativ bølgehøyde over dekk.....  | 41 |
| Tabell 29: Globale bevegelser i nullpunktet til koordinatsystemet .....                               | 41 |
| Tabell 30: Akselerasjoner i x, y, z retning for styrehuset .....                                      | 41 |
| Tabell 31: Relativ bølgehøyde over dekk .....   | 41 |
| Tabell 32: Maksimum relativ bølgehøyde over dekk .....  | 42 |
| Tabell 33: Minimum relativ bølgehøyde over dekk.....  | 42 |
| Tabell 34: Globale bevegelser i nullpunktet til koordinatsystemet .....                               | 42 |
| Tabell 35: Akselerasjoner i x, y, z retning for styrehuset .....                                      | 42 |
| Tabell 36: Relativ bølgehøyde over dekk .....   | 43 |
| Tabell 37: Maksimum relativ bølgehøyde over dekk i [m].....   | 43 |
| Tabell 38: Minimum relativ bølgehøyde over dekk i [m].....  | 43 |
| Tabell 39: Globale bevegelser i nullpunktet til koordinatsystemet .....                               | 47 |
| Tabell 40: Akselerasjoner i x, y, z retning for styrehuset .....                                      | 47 |
| Tabell 41: Relativ bølgehøyde over dekk .....   | 47 |
| Tabell 42: Maksimum relativ bølgehøyde over dekk .....  | 48 |
| Tabell 43: Minimum relativ bølgehøyde over dekk.....  | 48 |
| Tabell 44: Globale bevegelser i nullpunktet til koordinatsystemet .....                               | 48 |
| Tabell 45: Akselerasjoner i x, y, z retning for styrehuset .....                                      | 48 |



|   |    |
|---|----|
| Tabell 46: Relativ bølgehøyde over dekk .....                           | 49 |
| Tabell 47: Maksimum relativ bølgehøyde over dekk .....                  | 49 |
| Tabell 48: Minimum relativ bølgehøyde over dekk.....                    | 49 |
| Tabell 49: Globale bevegelser i nullpunktet til koordinatsystemet ..... | 50 |
| Tabell 50: Akselerasjoner i x, y, z retning for styrehuset .....        | 50 |
| Tabell 51: Relativ bølgehøyde over dekk .....                           | 50 |
| Tabell 52: Maksimum relativ bølgehøyde over dekk .....                  | 51 |
| Tabell 53: Minimum relativ bølgehøyde over dekk.....                    | 51 |
| Tabell 54: Globale bevegelser i nullpunktet til koordinatsystemet ..... | 52 |
| Tabell 55: Akselerasjoner i x, y, z retning for styrehuset .....        | 52 |
| Tabell 56: Relativ bølgehøyde over dekk .....                           | 52 |
| Tabell 57: Maksimum relativ bølgehøyde over dekk .....                  | 53 |
| Tabell 58: Minimum relativ bølgehøyde over dekk.....                    | 53 |
| Tabell 59: Globale bevegelser i nullpunktet til koordinatsystemet ..... | 53 |
| Tabell 60: Akselerasjoner i x, y, z retning for styrehuset .....        | 53 |
| Tabell 61: Relativ bølgehøyde over dekk .....                           | 54 |
| Tabell 62: Maksimum relativ bølgehøyde over dekk .....                  | 54 |
| Tabell 63: Minimum relativ bølgehøyde over dekk.....                    | 54 |
| Tabell 64: Globale bevegelser i nullpunktet til koordinatsystemet ..... | 55 |
| Tabell 65: Akselerasjoner i x, y, z retning for styrehuset .....        | 55 |
| Tabell 66: Relativ bølgehøyde over dekk .....                           | 55 |
| Tabell 67: Maksimum relativ bølgehøyde over dekk .....                  | 56 |
| Tabell 68: Minimum relativ bølgehøyde over dekk.....                    | 56 |
| Tabell 69: Globale bevegelser i nullpunktet til koordinatsystemet ..... | 57 |
| Tabell 70: Akselerasjoner i x, y, z retning for styrehuset .....        | 57 |
| Tabell 71: Relativ bølgehøyde over dekk .....                           | 57 |
| Tabell 72: Maksimum relativ bølgehøyde over dekk .....                  | 58 |
| Tabell 73: Minimum relativ bølgehøyde over dekk.....                    | 58 |
| Tabell 74: Globale bevegelser i nullpunktet til koordinatsystemet ..... | 58 |
| Tabell 75: Akselerasjoner i x, y, z retning for styrehuset .....        | 58 |
| Tabell 76: Relativ bølgehøyde over dekk .....                           | 59 |
| Tabell 77: Maksimum relativ bølgehøyde over dekk .....                  | 59 |
| Tabell 78: Minimum relativ bølgehøyde over dekk.....                    | 59 |
| Tabell 79: Globale bevegelser i nullpunktet til koordinatsystemet ..... | 60 |
| Tabell 80: Akselerasjoner i x, y, z retning for styrehuset .....        | 60 |
| Tabell 81: Relativ bølgehøyde over dekk .....                           | 60 |
| Tabell 82: Maksimum relativ bølgehøyde over dekk .....                  | 61 |
| Tabell 83: Minimum relativ bølgehøyde over dekk.....                    | 61 |

Figurer

|  |           |
|--|-----------|
| Figur 1: Modell laget i GeniE.....   | 6         |
| Figur 2: Oversikt Sesam Manager [5] .....                                      | 8         |
| Figur 3: Panelmodell, tankinndeling og strukturmodell importert fra GeniE..... | 9         |
| Figur 4: diffraksjon og stråling [7] .....                                     | 9         |
| Figur 5: Flåteanalyse i Xtract .....   | 11        |
| Figur 6: Irregulære bølger[10].....  | 12        |
| Figur 7: Irregulær sjøtilstand delt opp i regulære bølger[10].....             | 12        |
| Figur 8: Energifordeling i bølgen[10].....                                     | 12        |
| Figur 9: Eksempel JONSWAP bølgespekter .....                                   | 16        |
| Figur 10: Eksempel RAO hiv .....   | 16        |
| Figur 11: Eksempel responspekter .....   | 17        |
| Figur 12: Koordinatsystem til et vilkårlig skip[13] .....                      | 17        |
| Figur 13: Illustrasjon av et skips frihetsgrader[13].....                      | 18        |
| Figur 14: Nautiske soner .....   | 19        |
| Figur 15: Scatter diagram[15] .....  | 20        |
| Figur 16: Tversskipsstabilitet [17].....                                       | 23        |
| Figur 17: Opprettende moment [19].....   | 24        |
| Figur 18: Forholdet mellom GZ, GM og krengevinkel [19] .....                   | 25        |
| Figur 19: GZ-kurve [12].....   | 25        |
| Figur 20: GZ-kurve lettskips intakt for SalMar flåten .....                    | 26        |
| Figur 21: $T = 5.5$ s, $f = 0.181$ Hz, møtende sjø, skråsjø og sidesjø .....   | 28        |
| Figur 22 $T = 5.0$ s, $f = 0.2$ Hz, møtende sjø, skråsjø og sidesjø .....      | 28        |
| Figur 23 $f = 0.2$ Hz, $T = 5$ s, møtende sjø, skråsjø og sidesjø .....        | 29        |
| Figur 24 $f = 0.180$ Hz, $T = 5.5$ s, møtende sjø, skråsjø og sidesjø .....    | 29        |
| Figur 25: Airgap [11] .....  | 31        |
| Figur 26 mot- og medfase mellom konstruksjon og bølge.....                     | 32        |
| Figur 27: Intakt stabilitet lettskips .....                                    | 34        |
| Figur 28: Intakt stabilitet fullastet .....                                    | 34        |
| <i>Figur 29: Jag .....</i>   | <i>38</i> |
| <i>Figur 30: Svai .....</i>  | <i>38</i> |
| <i>Figur 31: Hiv .....</i>   | <i>38</i> |
| <i>Figur 32: Rull.....</i>   | <i>38</i> |
| Figur 33: Stamp.....   | 38        |
| Figur 34: Gir.....   | 38        |
| <i>Figur 35: Jag .....</i>   | <i>45</i> |
| <i>Figur 36: Svai .....</i>  | <i>45</i> |
| <i>Figur 37: Hiv .....</i>   | <i>45</i> |
| <i>Figur 38: Rull.....</i>   | <i>45</i> |
| Figur 39: Stamp.....   | 45        |
| Figur 40: Gir.....   | 45        |

## Kildeliste

- [1] Barentswatch, «Fra hobby til avansert biologisk oppdrettsproduksjon,» mai 2012,  
<https://www.barentswatch.no/artikler/Norsk-oppdrettsnaring/>
- [2] Fiskeridirektoratet, «Nøkkeltall fra norsk havbruksnæring 2018,» juli 2019,  
<https://www.fiskeridir.no/content/download/25912/371178/version/5/file/nokkeltall-havbruk-2018.pdf>
- [3] J.R.Krokstad og M. Lønseth, «Stabilitet og sikkerhet for havbruksflåter i sjøgang», Sintef, februar 2003
- [4] NORDFORSK (1987). Assessment of ship performance in a seaway, NORDFORSK
- [5] DNVGL, «Sesam feature description», september 2019
- [6] A.B. Berdal, «Managing Sesam analysis workflows», januar 2017.
- [7] DNVGL, «Wadam user`s manual», mars 2017.
- [8] DNVGL, «Postresp user`s manual», februar 2017.
- [9] DNVGL, “Environmental conditions and environmental loads”, DNV-RP-C205, april 2007.
- [10] HVL, Hydrodynamikk, Vår 2019, kompendier,  
<https://home.hvl.no/ansatte/tct/ftp/V2019%20Hydrodynamikk/Kompendier/JordeBevIrregSj%C3%B8%201-20.pdf>
- [11] W.H. Lee, «Prediction of air gap for column stabilised units», februar 2017.
- [12] Norsk Standard, «Flytende oppdrettsanlegg-krav til lokalitetsundersøkelse, risikoanalyse, utforming, dimensjonering, utførelse, montering og drift», NS9415, 2003
- [13] Stenfelt, Gloria, «Forelesningsnotater», april 2019,  
[https://home.hvl.no/ansatte/gste/ftp/MAS124\\_Intro\\_Marinteknikk/Kompendier\\_Notater/Notater/Forelesningsnotater\\_GS\\_HVL.pdf](https://home.hvl.no/ansatte/gste/ftp/MAS124_Intro_Marinteknikk/Kompendier_Notater/Notater/Forelesningsnotater_GS_HVL.pdf)
- [14] Wikipedia, «Frihetsgrad (fysikk)», oppdatert mai 2020,  
[https://no.wikipedia.org/wiki/Frihetsgrad\\_\(fysikk\)](https://no.wikipedia.org/wiki/Frihetsgrad_(fysikk))
- [15] DNVGL, “Wave loads”, DNVGL-CG-0130, januar 2018.
- [16] Wikipedia, “Flytestabilitet”, oppdatert November 2018,  
<https://no.wikipedia.org/wiki/Flytestabilitet>
- [17] Marfag, «Tverrskipsstabilitet», ukjent publiseringsdato,  
<https://www.marfag.no/k12/2-tverrskipsstabilitet>
- [18] Brudevoll, Bjørn Aakre; Hagen, Arnulf; Osnes, Andreas: «Metasenter i Store norske leksikon» på snl.no. Hentet 23. mai 2020 fra <https://snl.no/metasenter>
- [19] Maritimstart, «Stabilitet», ukjent publiseringsdato,  
<https://maritimstart.no/maritimstart-spesial/stabilitet/>
- [20] Holm, Håvard, «Oppdrift og stabilitet», Havromteknologi, Januar 2014,  
<https://www.ntnu.no/documents/14574940/d8c82b90-d273-4d58-a213-9051d41d5ff9>
- [21] Sawicon AS, «Wave load analysis for concrete feeding barge Salmar 17x34», oktober 2019.

[22] *Resonans* i *Store norske leksikon* på [snl.no](https://snl.no). Hentet 23. mai 2020 fra <https://snl.no/resonans>



