

Konstruksjon og testing av en 1:100 skalamodell av INO WINDMOOR 12 MW flyten- de vindturbin

Edvard Holberg
Jonathan Haugen Hofstad
Max Georg Flinstad

Bacheloroppgave i Marinteknikk
Bergen, Norge 2023





Høgskulen
på Vestlandet

Konstruksjon og testing av en 1:100 skalamodell av INO WINDMOOR 12 MW flytende vindturbin

Edvard Holberg
Jonathan Haugen Hofstad
Max Georg Flinstad

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

IMM 2023-M32

Høgskulen på Vestlandet
Institutt for Maskin- og Marinfag
Inndalsveien 28,
NO-5063 Bergen, Norge

Cover and backside images © Norbert Lümmer

English title:	Construction and testing of a 1:100 scale model of INO WIND-MOOR 12 MW floating wind turbine
Forfatter(e), studentnummer:	Edvard Holberg591408 Jonathan Haugen Hofstad591393 Max Georg Flinstad585084
Studieprogram:	Marinteknikk
Dato:	Mars 2023
Rapportnummer:	IMM 2023-M 32
Veileder ved HVL:	David Lande-Sudall og Gloria Maria Stenfelt
Oppdragsgiver:	HVL
Oppdragsgivers referanse:	David Lande-Sudall og Gloria Maria Stenfelt
Antall filer levert digitalt:	1/1

Forord

Denne rapporten markerer slutten på tre års utdanning ved Høgskulen på Vestlandet (HVL), Bergen, Norge innenfor marinteknikk. Det har vært tre tunge men samtidig innholdsrike år med mye læring vi ikke ville vært foruten.

Prosjektet gjøres på Høgskulen på Vestlandet (HVL), campus Bergen med Dr. David Lande-Sudall som veileder og prosjektleder og Dr. Gloria Maria Stenfelt som veileder. Dr. David Lande-Sudall og Dr. Gloria Maria Stenfelt er Førstemanuensis ved Institutt for maskin- og marinfag ved HVL. Hovedfokuset underveis i prosjektet er å lage en modell av en halvt nedsenkbar vindturbin og teste modellen i MarinLab på HVL slik at den kan brukes til videre forskning og undervisning. Modellen skal bygges i skala 1:100 og skal etter beste evne ha lik karakteristik som en tilsvarende modell ved Sintef, Trondheim.

Vi ønsker å takke begge våre veiledere for gode tilbakemeldinger og hjelp underveis i prosjektet, både med ideer om hvordan det kan være lurt å bygge modellen og også til gjennomgang av rapporten. De ukentlige møtene med dere har hjulpet oss godt på vei og gjort det mulig å kunne levere dette arbeidet.

Vi ønsker også å takke lab ingeniørene på HVL, Harald Moen, Kjetil Gravelsæter, Frode Wessel Jansen og Nafez Ardestani for god hjelp i labben til å maskinere og montere de forskjellige delene av modellen utenfor vår kunnskap. Det må også rettes en takk til HVL som har finansiert byggingen av modellen og hatt lokaler med det utstyret som var nødvendig.

Sammendrag

Denne rapporten tar for seg design, montering og testing av en modell for en flytende vindturbin fra starten med nedskalering og CAD tegninger, monteringsprosessen, testing i tank og analyse av data fra disse testene. Rapporten vil beskrive designprosessen, inneholde materialvalg og hvordan sluttproduktet er blitt til gjennom iterative prosesser. Den vil også ta for seg selve monteringsprosessen av modellen og hvordan det er tenkt å gå frem for å få et tilfredsstillende produkt.

Rapporten tar for seg relevant teori innenfor skalering av en modell, hydrostatiske egenskaper, bølgestatistikk og hvordan modellen vil teoretisk oppføre seg. Siden oppgaven handler om bygging av modellen, er det lagt stor vekt på hvordan modellen monteres og hvorfor de forskjellige delene er konstruert slik de er konstruert. Det er også fokus på de individuelle delene og deres egenskaper. Innunder design og konstruksjon vil de individuelle stegene forklares med forskjellige iterasjoner av modellen underveis som førte til at den endte opp slik den er nå og hvorfor den er slik.

Under testingen i tanken er det gjennomført tester hvor relevant teori blir brukt, de forskjellige testene blir forklart og data fra disse blir hentet ut og representert i rapporten. Det er også forklart hvilke forberedelser med tanke på kalibrering og oppsett som er nødvendig for de forskjellige testene.

De forskjellige testene representeres mot slutten av rapporten hvor målingene fra testene blir presentert og det ble konkludert med at modellen i stor grad er stabil og ligger fint i bølgene selv om det under noen sjøtilstander kan oppstå fare for resonans, disse er det ønskelig å utforske videre. Det er ulike grunner til at modellen ligger i område for resonans. Disse blir forklart videre i rapporten samtidig som eventuelle utbedringer av modellen blir undersøkt.

Selv om ikke alle de testene som var ønsket ble gjennomført er dette et godt utgangspunkt til videre testing og læring, samtidig som videreutvikling av modellen. Alle testene ble ikke gjennomført ettersom tidsrommet for testing i tanken er begrenset.

Abstract

This report addresses the design, assembly, and testing of a model for a floating wind turbine, starting from the down-sizing process and CAD drawings, the assembly process, testing in a tank, and analysis of data from these tests. The design process will include material selection and how it has been iterated to reach the final product. It will also cover the assembly process of the model and the intended approach to achieve a satisfactory product.

The report covers relevant theory related to model scaling, hydrostatic properties, wave statistics, and the theoretical behavior of the model. Since the task revolves around building the model, significant emphasis is placed on how the model is assembled and why the different parts are constructed as they are. There is also a focus on the individual components and their properties. Within the design and construction, the individual steps will be explained, including various iterations of the model along the way that led to its current form and the reasons behind it.

During testing in the tank, tests have been conducted utilizing relevant theory. The different tests are explained, and data from these tests are extracted and represented in the report. The necessary preparations for calibration and setup for the various tests are also explained.

The different tests are presented towards the end of the report, where measurements from the tests are presented, and conclusions are drawn based on the conducted tests. The preliminary results show that the model is largely stable and performs well in the waves, although there may be a risk of resonance under certain sea conditions, which requires further exploration. The reasons for the model being in the resonance range are explained further in the report, along with possible improvements to minimize this issue.

Although not all desired tests were conducted, this report provides a good starting point for further testing, learning, and further development of the model.

Innhold

Forord	i
Sammendrag	iii
Abstract	v
1 Innledning	1
2 Teori	2
2.1 Skalering fra fullskala til modell	2
2.2 Hydrostatikk	3
2.3 Bølgestatistikk og dynamiskrespons	4
2.4 Konstruksjonens bevegelse	4
3 Tilvirkningsprosess	6
3.1 Konstruksjonsvalg	6
3.1.1 Nedskalering	6
3.1.2 Valg av materialer	6
3.1.3 Iterasjoner av modellen	7
3.1.4 Første iterasjon	7
3.1.5 Andre iterasjon	7
3.1.6 Tredje iterasjon	7
3.1.7 Fjerde iterasjon	7
3.2 Komponenter	7
3.2.1 Bunnplate og topplate	8
3.2.2 Indre sylinder	8
3.2.3 Aluminiumrør	8
3.2.4 Støttestag og hylse	8
3.2.5 Turbinkrage	9
3.2.6 Gjengestagene	9
3.2.7 Toppkapsel og bunnkapsel	9
3.2.8 Reflektorhylser	9
3.2.9 Tårn	9
3.3 Montering	9
3.3.1 Sveising	9
3.3.2 Vanntetting	10
3.3.3 Tilpassing av deler	10
3.3.4 Glassfiber	10
3.3.5 Lakkering	10
3.3.6 Ballast	10
4 Eksperimentell metode	12
4.1 Oppsett i tank	12
4.1.1 Forankring	13
4.2 Tester	13
4.2.1 Decaytest	13
4.2.2 Irregulær bølgetest	14
4.2.3 Hvit støy (<i>Whitenoise</i>)	14
4.2.4 Utrekningstest (<i>Pull – outtest</i>)	14
4.3 Kalibrering	14
4.3.1 Lastceller	14
4.3.2 Bølgemålere	15
4.3.3 Qualisys bevegelse måleutstyr	15
4.3.4 Edinburgh designs bølgegenerator	15
4.4 Feilkilder	16

5	Resultater	17
5.1	Hydrostatiske resultater	17
5.2	Decaytester resultater	18
5.3	Irregulære bølgetester	21
5.3.1	Hs = 0,062 Tp = 0,9 Angrepsvinkel = 0 grader	22
5.3.2	Hs = 0,062 Tp = 1,9 Angrepsvinkel = 0 grader	22
5.3.3	Hs = 0,15 Tp = 1,4 Angrepsvinkel = 0 grader	23
5.3.4	Hs = 0,062 Tp = 0,9 Angrepsvinkel = 180 grader	23
5.3.5	Hs = 0,062 Tp = 1,9 Angrepsvinkel = 180 grader	24
5.3.6	Hs = 0,15 Tp = 1,4 Angrepsvinkel = 180 grader	24
5.4	hvit støy	24
5.4.1	Hs = 0,02 Frec = 0,05 - 2,0	24
5.4.2	Hs = 0,02 Frec = 0,2 - 2,0	25
5.4.3	Hs = 0,04 Frec = 0,2 - 2,0	25
5.5	Hvit støy 180 graders system	26
5.5.1	Hs = 0,02 Frec = 0,05 - 2,0	26
5.5.2	Hs = 0,02 Frec = 0,2 - 2,0	26
5.5.3	Hs = 0,04 Frec = 0,2 - 2,0	27
6	Konklusjon	28
7	Videre arbeid	28
	Referanser	30
	Vedlegg	31
	Vedlegg A: Tegninger	31
	Vedlegg B: MATLAB skript	43
	.01 Jonswap 0 grader	65
	.02 Jonswap 180 grader	72
	.03 hvit støy 0 grader	79
	.04 hvit støy 180 grader	86

1 Innledning

I en periode der grønn energi satses på av de fleste energi selskaper og fokuset flyttes fra fossile brensler til fornybar energi. For å kunne kutte klimagassutslipp er fornybar energi en god løsning. Dette støttes direkte av FN sine bærekraftsmål 7, 8 og 13[1]. Vindturbiner er høyst aktuelle for bærekraftmålene, da de kan levere store mengder strøm, spesielt hvis det er offshore turbiner som står ute i havet der det blåser oftere, kraftigere og mer stabilt samtidig som de ikke er like forstyrrende visuelt[2]. Dette kommer ikke uten utfordringer da havet er et tøft miljø både for montering og vedlikehold av turbinene, men også de kreftene som virker på turbinene etter utplasseringen i form av bølger, kraftige vinder og korrosjon. Selv om det allerede finnes mye data på dette er det fortsatt viktig med videre forskning, spesielt når det kommer nye løsninger med større turbiner som står på dypere havdyp. Forskningen hittil har i stor grad fokusert på bunnfaste konstruksjoner fremfor flytende. Derfor har denne oppgaven som mål å designe og produsere en modell av en teoretisk fullskala halvt nedsenkbar vindturbin (WINDMOOR 12 MW) i en skala på 1:100. Ved å gjøre dette er det mulig å teste hvordan konstruksjonen vil oppføre seg i ulike sjøtilstander med og uten vindlast. Den teoretiske fullskala konstruksjonen modellen representerer er en kombinasjon av Energy Agency Wind Technology Collaboration Programme (IEA 10 MW) og GE's Haliade X 12 MW turbin. Hoveddesignet er hentet ifra

WINDMOOR 12 MW da dette har flest likheter mot offshore turbiner, mens data for nacellen/huben er hentet ifra Haliade X 12 MW turbinen [3]. Modellen designes i CAD (Creo Parametric) hvor alle de ulike delene tegnes og produseres på maskinlaben ved HVL og til slutt monteres. Under designprosessen er det lagt vekt på at dette er en modell som HVL kan bruke til videre forelesing og forskning, slik at det skal være mulig å gjøre endringer på størrelsen på tårnet og ballastvekter for testing av ulike løsninger av turbinen. Det er derfor viktig at det er en solid modell som tåler å bli løftet inn og ut av bølgetanken i MarinLab mange ganger, likevel er muligheter for modifisering av modellen i fremtiden. Det vil derfor være et understell i aluminium som er sveiset slik at modellen tåler laster mens den delen av modellen som skal representere turbinen er avtagbar.



Figur 1: Modellskip i MarinLab ved Høgskulen på Vestlandet.

2 Teori

I denne delen av rapporten presenteres relevant teori som blir brukt gjennom prosjektet.

2.1 Skalering fra fullskala til modell

Fysiske modeller skal representere fullskala problemer så nær som mulig i en mindre skala. I denne seksjonen av rapporten vil skaleringslover og egenskaper som skal til for å få en så god modell som mulig legges frem. Likhet mellom fullskala og modell er essensielt for å få samsvar i resultater fra testingen og de gitt i Sintef sin rapport for samme design. For å oppnå likhet mellom modellen og fullskala må modellen være, geometrisk-, kinematisk- og dynamisk lik. I denne rapporten vil det bli sett bortifra kinematisk likhet fordi det ikke vil være noen slep eller at modellen beveger seg med en hastighet. Dragkrefter blir også antatt null for denne type konstruksjon. Geometrisk likhet vil si at fullskala og modell har lik form. Det betyr at mellom fullskala og modell er det en faktor [4]. Skaleringsfaktoren er gitt ved

$$\lambda = \frac{L_f}{L_m}, \quad (1)$$

hvor L er en lengde, og f og m underskrift er brukt gjennom hele rapporten og betyr fullskala og moellskala, henholdvis. I denne rapporten vil en skaleringsfaktor (λ) på 100 bli brukt, det vil si at en vilkårlig lengde på fullskala er 100 ganger større enn den samme lengden på modellen.

For dynamisk likhet vil det si at kreftene på konstruksjonen har samme forhold. Hvis det er geometrisk likhet og dynamisk likhet vil det også opptre kinematisk likhet. De viktigste kreftene vil være, treghetskrefter F_i og gravitasjonskrefter F_g [4]. For treghetskrefter gjelder

$$F_i \propto \rho \frac{dU}{dt} L^3 = \rho \frac{dU}{dx} \frac{dx}{dt} L^3 \propto \rho U^2 L^2, \quad (2)$$

hvor ρ er fluidets tetthet, U er hastighet, t er tid og L er lengde.

For gravitasjonskrefter brukes

$$F_g \propto \rho g L^3, \quad (3)$$

hvor g er gravitasjons akselerasjon.

Ved hjelp av disse ligningene kan Froude-tallet beregnes, Froude-tallet bruker forholdet mellom treghetskreftene og gravitasjonskreftene

$$\frac{\text{Treghetskrefter}}{\text{Gravitasjonskrefter}} = \frac{F_i}{F_g} \propto \frac{\rho U^2 L^2}{\rho g L^3} = \frac{U^2}{gL}. \quad (4)$$

For at dynamisk likhet mellom modell og fullskala skal bli oppfylt sammenlignes siste ledd i ligning 4. Det blir da:

$$\frac{U_m^2}{gL_m} = \frac{U_f^2}{gL_f} = F_n. \quad (5)$$

Er det likhet mellom Froude-tallet i modell og fullskala vil det sørge for at gravitasjonskreftene er riktig skalert. Det vil også sørge for at bølgeomstand og bølgekrefter er riktig skalert siden overflatebølger er gravitasjonsbaserte bølger.

Fra ligning (5) kan man sette inn geometrisk likhet kravet fra ligning (1) slik at man får Froude-skaleringen.

$$\frac{U_m}{\sqrt{gL_m}} = \frac{U_f}{\sqrt{gL_f}} \rightarrow U_f = U_m \sqrt{\frac{L_f}{L_m}} = U_m \sqrt{\lambda} \quad (6)$$

Fra dette kan en tabell lages for Froude-skaleringen [5].

Tabell 1: Skalering mellom fullskala og modell

Parameter, [enhet]	Skalering	Eksempel
Lengde, [m]	λ	$L_f = L_m \lambda$
Deplasement masse, [kg]	λ^3	$\Delta_f = \Delta_m \lambda^3$
Deplasement volum, [m ³]	λ^3	$\nabla_f = \nabla_m \lambda^3$
Areal treghetsmoment, [m ⁴]	λ^4	$I_{x,f} = I_{x,m} \lambda^4$
Rulleperiode, [s]	$\sqrt{\lambda}$	$T_{r,f} = T_{r,m} \sqrt{\lambda}$
Krefter, [N = $\frac{\text{kgm}}{\text{m}^2}$]	λ^3	$g\Delta_f = g\Delta_m \lambda^3$
Masse treghetsmoment, [kgm ²]	λ^5	$I_{xx,f} = I_{xx,m} \lambda^5$
Treghetsradius, [m]	λ	$R_{xx,f} = R_{xx,m} \lambda$

2.2 Hydrostatikk

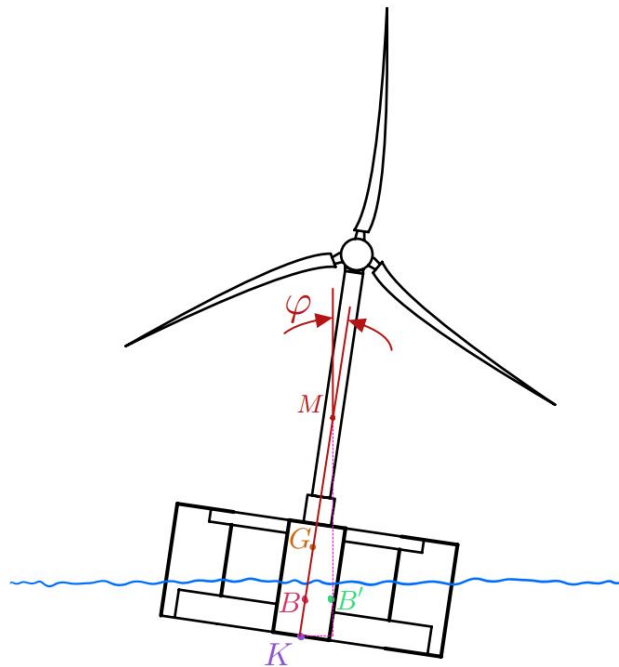
Innen fluidmekanikk er hydrostatikk delen som omhandler væsker i ro. I denne delen av teorien vil det bli fremlagt teori om oppdrift og stabilitet. For å forstå oppdriften til en konstruksjon må man forstå Arkimedes lov. Arkimedes lov sier at et objekt som er helt eller delvis neddykket i væske eller gass, vil få en oppdrift lik tyngden av væsken som blir fortrent. Dette vil si at et objekt som ligger i vann vil synke til vekten av det fortrente vannet er lik vekten av objektet. Dette gjør at man får en likevekt [6].

$$\text{Tyngde} = \text{Oppdrift} \quad (7)$$

$$\Delta g = \nabla \rho g \quad (8)$$

$$\Delta = \nabla \rho \quad (9)$$

For stabilitet er det fire forskjellige geometriske punkter som er viktig. Disse er metasenteret (M), flotasjonssenteret (F), tyngdepunktet (G) og kjølen (K). Stabiliteten til konstruksjonen avhenger av hvor tyngdepunktet og oppdriftssenteret ligger. Når krengeing eller trim oppstår vil også oppdriftssenteret flytte på seg. Det oppstår også et rettende moment som skal stabilisere konstruksjonen. Metasenteret vil da være ved krysningen av gammel og ny oppdriftslinje når skipet krenger med vinkelen ϕ . Se figur 2



Figur 2: Diagram av en halvt nedsenkbar flytende vindturbin, viser hvordan oppdriftssenteret beveger seg med en krengevinkel ϕ .

For de små krengevinklene, 4 - 5 grader, vil avstanden fra tyngdepunktet til metasenteret, metasenterhøyden (GM), bestemme stabiliteten til skipet. Skulle da tyngdepunktet havne over metasenteret så vil metasenterhøyden bli mindre enn null. Det vil da oppstå et veltende moment. For å finne denne distansen for GM brukes de geometriske punktene.

$$GM = KB + BM - KG, \quad (10)$$

hvor er KB avstand fra kjøll til oppdriftssenter, BM er initialmetasenterhøyde og KG er avstand fra kjøll til tyngdepunkt. Er $GM > 0$ har vi stabilitet, $GM = 0$ er det labilt og $GM < 0$ er det ustabil. Verdiene for KB og BM er gitt ved

$$KB = \frac{\sum V_i z_i}{\nabla}, \quad (11)$$

$$BM = \frac{I}{\nabla}, \quad (12)$$

hvor ∇ er det neddykket volumet og V er alle volumandele og z er avstanden til midten av volumene. I er arealtreghetsmomentet i vannlinjen. For denne oppgaven blir det brukt arealtreghetsmoment basert på sirkulære tverrsnitt i vannlinjen

$$I_0 = \frac{\pi d^4}{64}, \quad (13)$$

hvor d er diameter på det sirkulære tverrsnittet. Det må også ta hensyn til Steiner satsen

$$I = I_0 + Ae^2, \quad (14)$$

hvor A er arealet av Steiner bidraget og e er avstanden. For plasseringen av tyngdepunktet G blir dette bestemt utifra lettskipets initiale tyngdepunkt og av hvordan lastene ombord er plassert. Det vertikale tyngdepunktet bestemmes av avstand i z -retning fra kjøl [6]. Dette er gitt ved

$$z_g = KG = \frac{\sum m_i z_i}{\sum m_i} = \frac{\sum m_i z_i}{\Delta}, \quad (15)$$

hvor det er de forskjellige massene med avstanden til tyngdepunktet dens over massen til hele konstruksjonen.

2.3 Bølgestatistikk og dynamiskrespons

Innen hydrodynamikk blir offshore konstruksjonens respons mot bølgekrefter analysert ved hjelp av lineært tidsinvariant system, som viser forholdet mellom input bølgekrefte mot bevegelsen som oppstår av de [7]. Disse modellene er ofte i frekvensdomene ved bruk av transferfunksjoner, som viser amplituden og fasen av responsen ved forskjellige bølgefrequenser. Dette gjør at man tar i bruk RAO (Respons Amplitude Operator) som er et sett med statistikk som kan brukes til å få en forståelse for hvordan konstruksjonen vil oppføre seg. I frekvensdomenet kan dette skrives som ligning 16

$$|H(\omega)|^2 = \left(\frac{S_{xx}(\omega)}{S_{yy}(\omega)} \right) \quad (16)$$

hvor $H(\omega)$ er transferfunksjonen, S_{xx} er input bølgespekteret og S_{yy} er responspekteret.

Bølgekrefte som virker på en offshore konstruksjon er karakterisert av deres statistiske egenskaper, som bølgespekteret, bølgehøydefordelingen og bølgeretningen. Disse egenskapene er viktige for å forutsi responsen til konstruksjonen i en virkelig sjøtilstand, da disse kan inneholde mange ulike frekvenser, høyder og retninger.

Det finnes flere statistiske modeller som kan beskrive et bølgespekter, et av disse er JONSWAP spekter. JONSWAP spekteret er en utvikling av Pierson-Moskowitz spekteret som ble laget for å lage et mer beskrevne spekter av vindgenererte bølger i blandt annet Nordsjøen og andre begrensede områder. JONSWAP står for Joint North Sea Wave Project. [8]. Et JONSWAP spekter er gitt ved ligning 17

$$S_{xx}(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} e^{(-\frac{5}{4}(\frac{\omega_p}{\omega})^4 \gamma^r)}, \quad (17)$$

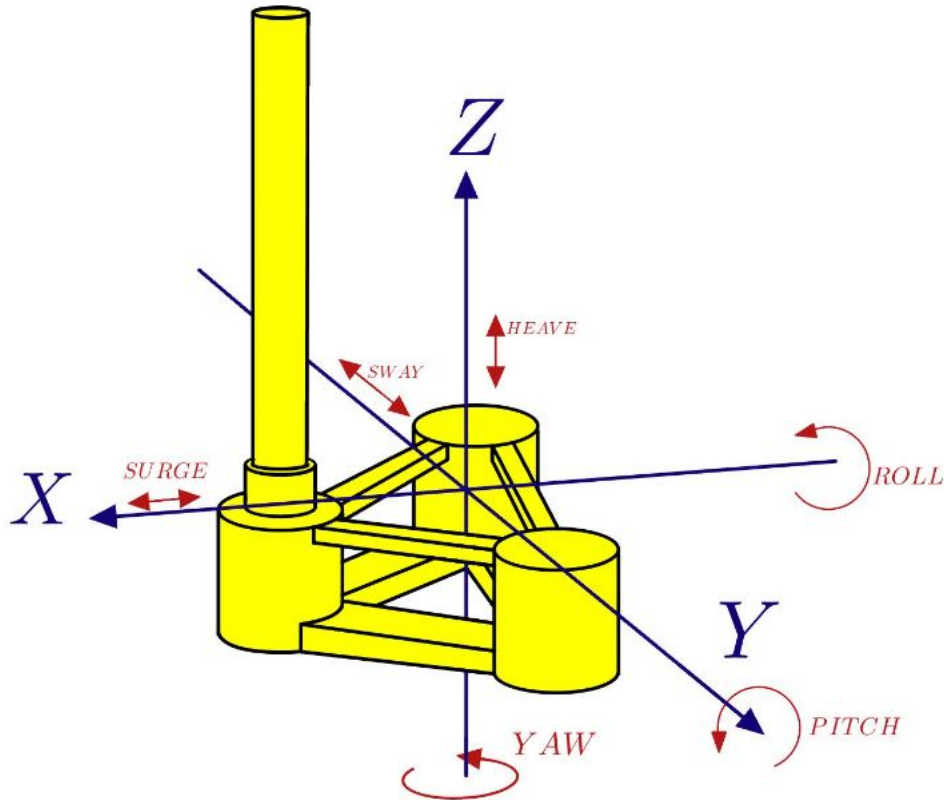
hvor S_{xx} er tettheten av bølgekrefte i spekteret, ω er vinkelfrekvensen, α er en konstant som avhenger av vindhastigheten, g er gravitasjonsakselerasjon, ω_p er toppvinkelfrekvensen, γ er en formparameter som bestemmes av frihetsgraden og energikonsentrasjonen fra toppperioden og r er en funksjon av γ . Bølgehøydefordeling beskriver sannsynligheten for at en bølgehøyde skal oppstå i en sjøtilstand. Denne sannsynligheten følger Rayleigh fordelingen som er gitt ved

$$f_H(h) = \frac{h}{H_s^2} e^{(-\frac{h^2}{2H_s^2})}, \quad (18)$$

hvor h er høyden og H_s er signifikant bølgehøyde.

2.4 Konstruksjonens bevegelse

For å forklare konstruksjonens bevegelse må det defineres et koordinatsystem i konstruksjonens tyngdepunkt om origo. Translasjonene x -, y - og z -bevegelse kalles jag, svai og hiv, henholdsvis. Rotasjoner rundt x -, y - og z -aksene kalles rull, stamp og gir, henholdsvis. Se figur 3



Figur 3: Diagram av en halvt nedsenkbar flytende vindturbin, viser frihetsgradene.

Disse bevegelsene kan uttrykkes på matrisform

$$\eta = [\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4, \eta_5, \eta_6] \quad (19)$$

hvor 1 er jag, 2 er svai og 3 er hiv, og lignende for rotasjonene. 4 er rull, 5 er stamp og 6 er gir. Fra dette kommer bevegelsesligningen for et 6-frihets-gradssystem som er lik

$$[M_{jk} + A_{jk}]\ddot{x} + [B_{jk}]\dot{x} + [C_{jk}]x = F, \quad (20)$$

hvor F er den totale kraften som påvirker objektet når det er satt i bevegelse. $M + A$ Leddet er masseleddet, hvor M er massen til konstruksjonen og A er tilleggsmassen. B er dempningsleddet, C er stivhetsleddet, j og k er for hvilken frihetsgrad det blir sett på, dette gjør at vi kan lage matriser som er 6x6 for M , A , C og B .

$$\begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 & 0 & A_{15} & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 & A_{24} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_{42} & 0 & A_{44} & 0 & 0 \\ A_{51} & 0 & 0 & 0 & A_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix}$$

Disse systemene ses på forskjellige ledd utifra hva egenfrekvensen er. For korte bølger vil masseleddene dominere, for resonansområde er det dempningsdominert og for lange bølger er det stivheten som dominerer. I denne rapporten vil det bare fokuseres på tilleggsmasse for jag på grunn av bevegelse i jag-retningen, A_{11} , svai i svai, A_{22} , hiv i hiv, A_{33} , rull i rull, A_{44} , stamp i stamp, A_{55} og gir i gir, A_{66} [9].

3 Tilvirkningsprosess

Her forklares det hvordan det er valgt å designe, hva det skal designes med og hvordan konstruksjonsprosessen blir gjennomført for modellen.

3.1 Konstruksjonsvalg

3.1.1 Nedskalering

Tabell 2 viser nedskalerte dimensjoner fra fullskala til modell. Dette er gjort ved hjelp av ligningene i seksjon 2.1

Tabell 2: Fullskala dimensjoner og modellens dimensjoner uten tårn.

Hva, [enhet]	Fullskala dimensjoner	Modell dimensjoner
Søyle diameter, [m]	15.0	0.15
Søyle høyde, [m]	31.0	0.31
Pongtong bredde, [m]	10.0	0.1
Pongtong høyde, [m]	4.0	0.04
Senter til senter, [m]	61.0	0.61
Koblingsbro bredde, [m]	3.5	0.035
Koblingsbro høyde, [m]	3.5	0.035
Totalt substruktur vekt, [t/kg]	11974.0 [t]	11.400 [kg]

3.1.2 Valg av materialer

Før design av deler kan begynne må valg av materialer vurderes nøye. Hovedmålet med denne prosessen er å finne de mest ideelle materialene å bygge modellen i. Det finnes flere materialer som har egenskaper som er nødvendige for bygging av en slik modell. Bygningsmaterialene må være lette å maskinere i labben på HVL. For styrken i modellen trengs et materiale som har lav tetthet, god styrke og ikke være for sprøtt. Tårnet bør være laget av et materiale som er lett og stiv ettersom det skal være langt i forhold til diameteren. I tabell 3 er ulike materialgrupper listet med eksempelmaterialer og egenskapene til dem. [10]

Tabell 3: materialtabell

Materialtype	Material	Egenskaper
Metall	Stål	Høy styrke, seighet, korrosjonsbestandighet
	Aluminium	Lett, god korrosjonsbestandighet, ledningsevne
Plastikk	PVC	Fleksibel, isolerende, motstandsdyktig mot kjemikalier
	ABS	God slagfasthet, formbarhet, motstandsdyktighet mot kjemikalier
	Divinycell	Lett, stiv, god isolasjonsevne
	Pleksiglass	Gjennomsiktig, sterk, motstandsdyktig mot værforhold
Kompositt	Glassfiber	Sterk, lett, høy motstandsdyktighet mot kjemikalier, korrosjon
	Karbonfiber	Ekstremt sterk, lett, høy stivhet

Mange faktorer spiller inn når materialene velges ut, likevel er den viktigste faktoren tettheten. Samtidig som tettheten må være lav må også styrkeegenskapene være gode i flere retninger. Andre kolonne i tabell 3 viser de materialene som er vurdert. Det er ønskelig å bruke mest mulig av materialene som allerede finnes i labben på HVL med tanke på usikkerheter rundt bestillingstider. Karbonfiber og PVC er de eneste materialene som ikke er tilgjengelige på labben og som eventuelt må bestilles.

Det blir brukt en kombinasjon av materialer for det beste mulige resultat. Aluminium er et godt materiale å bruke for det strukturelle i modellen ettersom det har lav vekt i forhold til styrken. Tårnet er den eneste hovedkomponenten som må bestilles inn ettersom det valgte materialet er PVC.

3.1.3 Iterasjoner av modellen

Underveis i prosessen er det foretatt en rekke endringer av hvordan modellen skal bygges grunnet varierende årsaker. Hovedårsaken til dette var i stor grad enten vektbesparelse eller begrensninger på utstyret som brukes til å lage delene. Dette fører til at det brukes mye tid på å tegne om deler som skulle maskineres eller 3D printes. Noen endringer er for å gjøre monteringen og selve byggingen av modellen enklere og med mindre rom for feil. Tabell 4 viser de ulike maskinene på HVL og begrensningene de har i forhold til produksjonsstørrelse og materialbegrensninger.

Tabell 4: Utstyrliste

Type maskin	Modell	Produksjonsområde	Materialbegrensning
Plasmakutter [11]	MicroCut-P 3001.15P+P	3000x1500x38.1 mm	Stål
4-akse CNC Fres [12]	QUASER MV 154 PL/12	1020x500x500 mm	Stål
CNC dreiebenk [13]	Doosan Lynx 220 LM	Ø510 mm x 610 mm	Stål
3D printer [14]	Flashforge 3D Printer Adventurer 4	220x200x250 mm	ABS, PLA, PC PETG, PLA-CF, PETG-CF

3.1.4 Første iterasjon

Første utkast av modellen baserer seg på å bygge hele modellen i aluminium der den settes sammen av plater og rør. Dette vil føre til en veldig fin og sømløs overflate der hele modellen er lagd av samme materiale. Ettersom alt vil være i aluminium fører det til mye sveising og for tung vekt. Problemer knyttet til å bestille deler som har riktige dimensjoner til å lage koblingsbroer og pongtonger uten at det må brukes mye tid på maskinering, gjør at dette er en løsning som ikke er gjennomførbar under tidsrammen.

3.1.5 Andre iterasjon

For å få ned vekten til modellen er det mulig å bytte ut deler av søylene til modellen med pleksiglass som har lavere tetthet en aluminium og beholde resten av første iterasjon. Her vil seksjonen mellom pongtongen og koblingsbroen på røret bli erstattet med pleksiglass. Da er det fortsatt mulig å sveise sammen pongtonger og koblingsbroer og få på plass topplokk og bunnlokk. På denne måten blir vekten lav nok til at modellen kan ballasteres. Grunnet skjøtene som oppstår mellom pleksiglasset og aluminiumen, vil det oppstå en større sannsynlighet for lekkasjer. Det er også nødvendig med mye maskinering av både aluminium og pleksiglass som vil være tidkrevende og vanskelig.

3.1.6 Tredje iterasjon

Dette fører til at søylene må være en hel del i aluminium for å unngå mulighet for lekkasjer, derfor må det fokuseres på vektbesparelse på støttestagene mellom søylene. Platene som skulle gi den ytre dimensjonen til pongtongene og koblingsbroene byttes ut med tynne aluminiumsrør som sparer modellen for mye vekt. For å feste støttestagene designes hylser som sveises fast i søylene. Dette vil gjøre det lettere å få senteravstanden mellom søylene rett. For å oppnå de ytre dimensjonene er planen å 3D printe deksler som legges rundt støttestagene. Denne måten er lett nok til å fortsatt kunne ballastere modellen tilstrekkelig. 3D - printerene på HVL kan ikke printe ut så store deksler i en del. Det som førte til at ideen om 3D printede deksler må forkastes var at det ferdigprintede materialet ikke er tett i seg selv. Dermed vil det trenge inn noe vann mellom dekslene og stagene som potensielt kan potensielt føre til tap av oppdrift og fri væskeoverflate.

3.1.7 Fjerde iterasjon

For å være sikre på at senteravstanden mellom søylene er så presis som mulig blir hylsene fra tredje iterasjon videreutviklet med en kant på baksiden og gjenger på innsiden. Dette gjør at man kan trekke søylene så langt fra hverandre som mulig før man sveiser dem fast og dermed få riktig senteravstand og vinkel mellom søylene. Stagene blir så dekket med kapsler laget av Divinycell[®] som veier mindre en 3D print og som tåler å stå i vann uten at det trekker til seg fukt. Søylene blir videreført i fra tredje iterasjon, for å spare vekt freses ned innvendig til en veggykkelse på 3 mm. Fresen har en dybde på 100 mm fra hver side. Dette gir stort nok vektutslipp til at tårnet kan plasseres i en holder som sveises på toppen av den ene søylen. Delenes utforming gjør det forholdsvis enkelt å maskinere dem. Antall sveiser reduseres til et minimum som gjør det lettere å få modellen tett.

3.2 Komponenter

Alle komponentene i modellen er konstruert med tanke på vekt, funksjonalitet og enkelhet i programmet Creo parametric [15]

Tabell 5: Komponentliste

Komponent	Seksjonsnummer	Figurnummer
Bunnplate	1	23
Topplate	1	31
Indre sylinder	2	24
Aluminiumrør	3	26
Støttestag	4	29
Hylse	4	28
Turbinkrage	5	32
Gjengestag	6	34
Gjengestag405	6	35
Toppkapsel	7	37
Bunnkapsel	7	36
Reflektorhylse turbintårn	8	38
Reflektorhylse gjengestag	8	39
Tårn	9	42

3.2.1 Bunnplate og topplate

Bunnplatene begynte som en 5 mm tykk aluminiumsplate som legges på en plasmakutter. Her blir seks identiske sirkulære disker skåret ut. Figur 23 og Figur 31 viser de ferdige platene. På tegningene er det mulig å se at begge platene har en kant som er frest ut hele veien rundt. Måten disse blir laget på er at diskene som blir skåret ut av plasmakutteren limes fast i en adapter som festes i CNC-fresen. CNC står for Computer Numerical Cutting som betyr at det er en datamaskin som styrer bevegelsene til maskinen. Kanten gjør videre sammentilling av komponenter mye lettere når platene kun kan sitte et sted på aluminiumrørene i figur 26.

3.2.2 Indre sylinder

Den indre sylindren i 24 som er festet på hver av bunnplatene er festepunktet til gjengestagene. Denne komponenten begynner som en solid sirkulær stang med aluminium som kappes opp i 3 like lengder. Deretter festes de i dreiebenken vist i tabell 4 som dreier dem ned til dimensjonene gitt i figur 24. Til slutt gjenges de opp til M8 for at gjengestagene i figur 34 og 35 passer ned i dem.

3.2.3 Aluminiumrør

Aluminiumsrøret er den vanskeligste komponenten å produsere ettersom den har tilsammen 5 hull som må freses ut fra siden av røret. 3-akse CNC fresen på HVL kan ikke produsere komponenten etter dimensjonene gitt i figur 26 i en operasjon. Dette er en prosess som må gjøres i flere operasjoner.

Prosessen begynner med å kappe et 150 mm sirkulært rør med en veggtykkelse på 5 mm opp i 3 like lengder. For å spare vekt i konstruksjonen freses rørene ned innvendig til en veggtykkelse på 3 mm. CNC maskinen kan maksimalt frese ned 100 [mm], derfor blir dette gjort fra begge sider. Deretter ble røret lagt på siden og hullene i siden på rørene freses ut. Hullene tilpasses med en dremel slik at hullene har lik dimensjon som på tegningene.

Det ene røret løsnet i CNC fresen som førte til at det oppsto to gjennomgående hull i røret. Senere i sveiseprosessen er dette utbedret ved å sveise igjen hullene.

3.2.4 Støttestag og hylse

Inni hver av pongtongene og koblingsbroene er det et støttestag og to hylser. Hylsene er produsert på den CNC styrte dreiebenken og gjenget opp innvendig til M20x1 slik figur 28 viser. Hylsene er designet på en slik måte at når de er festet sammen med støttestagene og aluminiumsrørene så er senteravstanden mellom aluminiumrørene akkurat 610 [mm].

Støttestagene begynner som sirkulære rør som kappes opp i 6 like lengder. Deretter gjenges de opp utvendig til M20x1 i begge ender slik figur 29 viser. Ettersom hylsene er gjenget opp kan senteravstanden mellom aluminiumrørene enkelt justeres dersom det skulle være nødvendig før de sveises fast.

3.2.5 Turbinkrage

Turbinkragen er festeinstallasjonen til tårnet og er festet på en av topplatene. Kragen har akkurat samme innvendig dimensjon som tårnet har utvendig dimensjon. I tillegg har den en ru overflate på innsiden slik at tårnet sitter godt fast. Turbinkragen er produsert på en CNC styrt dreiebenk etter dimensjoner gitt i figur 32.

3.2.6 Gjengestagene

Gjengestagene er vanlige stenger med M8 standardgjenger. Gjengestagene har to funksjoner hvor den ene er å sørge for at topplokkene sitter fast i aluminiumrørene. Den andre funksjonen er å være festepunkt til modellens ballastvekter.

Gjengestagene vist i figur 35 er litt lengre enn den vist i figur 34. Dette kommer av en tredje funksjon som forklares i seksjon 3.2.8. Når modellen testes i MarinLab på HVL brukes et Qualisys system for bevegelsessporing [4]. For at bevegelsene til modellen skal være mulige å spore må det festes reflektorer på modellen. For at bevegelsessporingen skal bli best mulig, må reflektorene være plassert slik at det er en høydeforskjell mellom dem. De må i tillegg være godt synlig for kamerasystemet slik at all bevegelse blir fanget opp. Derfor er de plassert oppå gjengestagene ca. 10 cm over dekk.

3.2.7 Toppkapsel og bunnkapsel

For å gi modellen korrekte ytre dimensjoner blir et materiale kalt Divinycell[®] brukt. Divinycell[®] er et PVC-basert materiale som finnes med flere forskjellige tettheter. Den typen som brukes for dette prosjektet er Divinycell[®] H60 [16]. Dette gjør at kapslene er veldig lette. Divinycell[®] blir mye brukt i modellbygging på grunn av sine egenskaper og i byggingen av INO WINDMOOR modellen er det et fint materiale ettersom det lett kan formes.

Figur 36 viser innkapslingen til støttestag lokalisert under vann. To kapsler utgjør en pongtong som det er tilsammen tre stykker av. Bunnkapslene begynner som Divinycell[®] plater som kappes opp i rektangulære klosser som limes fast (Multibond) i en adapter i CNC maskinen. Deretter freses bunnkapslene ut etter dimensjonen gitt i figur 36. Kapslene er designet med en mindre ytterdimensjon enn det de skal være. Dette kommer av at de skal kles i glassfiber for å gjøre det tett og bidra til å styrke opp modellen.

Toppkapslene i figur 36 er produsert på samme måte som bunnkapslene i CNC maskinen. Toppkapslene er mye mindre enn bunnkapslene slik tegningen viser. Dette fører til et problem i freseprosessen. Divinycell[®] er et sprøtt materiale som gjør at noen småbiter av endene i kapslene kan knekke av i freseprosessen. I tillegg er det vanskelig å få utfresingen rett siden kapslene er lange og tynne.

3.2.8 Reflektorhylser

For å feste reflektorene på modellen på en måte som gjør det lett å feste dem på akkurat samme sted mellom forsøkene må reflektorhylser designes. Reflektorhylsene vist i figur 39 er laget på en 3D printer og gjenget opp innvendig til M8 slik at de kan skrues ned på gjengestagene. Hvis endringer i ballasten må gjøres underveis i forsøkene, kan reflektorene enkelt tas av og bli satt på plass igjen på samme sted uten å ødelegge geometrien til modellen laget i qualisys programvaren.

Gjengestaget som er lokalisert der hvor tårnet står er ikke synlig for kamerasystemet. Her måtte en annen løsning tenkes ut. Resultatet vist i figur 38 viser to små søyler hvor reflektorene plasseres på toppen. Denne komponenten er produsert i en 3D printer og festet på modellen med dobbeltsidig teip. De to platene som stikker ut av bunnen er der for å kunne plassere installasjonen på akkurat samme sted hver gang.

3.2.9 Tårn

Tårnet er en av komponentene som ikke er tilgjengelig på labben ved HVL. Tårnet er laget av et PVC rør som kappes opp til dimensjonen vist i figur 42. Vekten av tårnet når det er ferdig kappet ble en del tyngre enn det det er i fullskala. Dette medførte at det ikke kan legges en ballastvekt i toppen av tårnet for å simulere vekten av nacellen og turbinen. Den ferdige modellen har det samme tyngdepunktet som i fullskala med ballastvekter. Den eneste forskjellen vil ligge i gyrasjonsraten til modellen.

3.3 Montering

3.3.1 Sveising

Mange av komponentene i modellen er laget av aluminium. For å feste aluminiumskomponentene sammen på best mulig måte kreves det sveising.

Sveiseprosessen i aluminium begynner med at alle overflater som skal sveises sammen må børstes med en alu-børste. Deretter må de vaskes med acetone for å fjerne alt overflødig støv i fra børstingen. Deretter skal komponentene sveises sammen ved hjelp av TIG sveising. For at sammenstillingen av komponentene skal være mulig må komponentene sveises i samme rekkefølge vist i Figur 25, 27, 30 og 33.

Først sveises den indre sylindere sammen med bunnplaten slik figur 25 viser. Ettersom aluminium har relativt lavt smeltepunkt, er det lett for at sveisen smelter igjennom komponentene. Dette problemet oppsto med en av de tre bunnplatene, og førte til at gjengingen i den indre sylindere ble ødelagt. Derfor gjenges den indre sylindere opp på nytt.

Deretter sveises bunnplaten sammen med aluminiumrøret [27]. Ettersom festepunktet til hylsene er plassert helt inntil sveiseområdet blir hullene i en liten grad deformert. Dette fikses med en dremel slik at hylsene kan tres igjennom hullene fra innsiden.

Figur 30 viser den ferdig sveisede modellen. Denne prosessen begynte med at alle hylsene blir tredd igjennom hullene i aluminiumrørene. Støttstagene blir skrudd inn på hylsene og senteravstanden mellom rørene blir verifisert. Når alle senteravstandene er lik [610mm], blir modellen festet fast i et bord med klemmer og tvinger. Alle hylsene får punktveiser slik at klemmene og tvingene kan løsnes. Deretter får alle hylsene en heltrukket sveis.

Det ene aluminiumrøret som fikk skade i CNC fresen repareres ved at hullene fylles igjen med sveis.

Figur 33 viser sveisingen mellom turbinkragen og en av topplatene. Ettersom sveisen er utvendig er det lett å få røret helt nedi kragen slik at høyden på tårnet blir rett.

3.3.2 Vanntetting

Alle punkter hvor vann kan lekke inn i modellen ble tettet med fugemasse. Steder hvor det typisk kan lekke er gjennom gjengene til hylsene og støttstagene. For å undersøke om modellen er tett fylles den med vann. Alle lekkasjepunkter markeres med tusj og sveiset på nytt. Dette blir gjentatt til modellen er helt tett.

3.3.3 Tilpassing av deler

Etter at Divinycell® er ferdig frest må det pusses med en dremel for å få tilpasset det rundt sveiser og lengden. Dette er grunnet vanskeligheten ved å maskinere noe som er så sprøtt på en CNC maskin og det blir derfor finpusset for hånd, fremfor at det knekker i CNC maskinen. Etter at alle delene paset på modellen limes de og settes under press før det dekkes av glassfiber og polyester. Dette gjøres for å få bedre kontroll på plasseringen og muligheten til å pusse ned Divinycell® slik at den blir som ønsket før det blir innesluttet. Alle delene får lim mellom både seg selv og aluminiums staget og alle åpninger blir forsøkt tettet med fugemasse. Det skal ikke være nødvendig at Divinycell® er helt vanntett, da sveisen mellom stagen og søylene er tette men det er greit at det er så tett som mulig. Limet står med klemmer på i 24 timer slik at det får tid til å herde før klemmene fjernes og det blir pusset ned.

3.3.4 Glassfiber

Siste steg i produksjonen er å legge glassfiber og polyester på Divinycell® kapslene. Å legge glassfiber er en krevende prosess som krever hurtig jobbing ettersom polyestere herder raskt. Først blir en duk i glassfiber klippet opp slik at den kan brettes rundt pongtongen. Deretter pensles pongtongen i polyesterblandingen før glassfiberduken legges på og brettes rundt. Glassfiberen pensles til slutt med polyesterblandingen til alt ligger jevnt. Ved å legge glassfiberen på denne måten oppstår det mange bobler og runde kanter som må slipes vekk. Modellen har mange skarpe kanter og vinkler som gjør at denne metoden å legge glassfiber på ikke er den beste.

For de to resterene pongtongene og koblingsbroene blir glassfiberduken klippet opp slik at det er en duk per flate. Dette fører til at det skarpkantede designet til modellen kan lettere opprettholdes. Ved å legge glassfiberen på denne måten oppstår det ikke bobler under glassfiberen og overflatene blir finere enn om det gjøres på den første måten. Polyestere herder skikkelig på 24 timer.

Etter polyestere er herdet må overflatene pusses ned til dimensjonene gitt i tabell 2. Dette er en tidkrevende prosess som må gjøres før modellen lakeres. Ettersom alle overflatene er flate gjør det pussingen til en enklere prosess.

3.3.5 Lakkering

Etter modellen er ferdig pusset må den blåses ren for alle overfløydige støvpartikler som blir gjort med en kompressor. Når modellen er ren begynner lakkeringen. Modellen henges i taket for å komme til alle overflater på modellen uten å berøre den underveis i prosessen. Først legges et strøk med grunning slik at malingen som kommer på toppen fester seg bedre til modellen. Grunningen trenger ti minutter for å tørke før toppstrøkene kan legges på. Fargen valgt for denne modellen er signalgul for at alle bevegelsene i testene skal være lette å fange opp. Det blir tilsammen lagt på tre strøk med signalgul for at fargen skulle være jevn over hele modellen.

3.3.6 Ballast

Slik modellen er designet er det nødvendig med tilstrekkelig mengde ballast for at modellen skal flyte uten trim eller krenge ved rett dypgang. For å finne ut nøyaktig hvor mye ballast som skal i hver av søylene til modellen, er Creo

Parametric et nyttig verktøy. I Creo er det mulig å gi alle delene i modellen en materialtetthet og en plassering i forhold til koordinatsystemet gitt i oppgaven. Etter at det var lagt inn er det mulig å finne ut hvor mye vekt som måtte legges til i modellen for å få den på rett dypgang uten krenging eller trimming.

For å få modellen til å ligge på vannet uten trimming eller krenging må det legges til en vekt som simulerer vekten av tårnet i de to andre søylene. Dette er for å få tyngdepunktet til modellen i x og y retning midt i mellom de tre søylene.

Når modellen ligger uten trimming eller krenging gjenstår det å legge til en lik mengde vekt i hver av søylene for å få dypgangen til 15.5[cm]. I Creo hvor alle delene passer perfekt sammen og alt er symmetrisk er det lett å finne ut av hvor mye vekt som skal til for å få dypgangen rett. Likevel, etter alle delene har vært igjennom ulike sammenstillingsprosesser hvor noe vekt har blitt fjernet og noe vekt har blitt lagt til er det ikke lenger lett å vite hvor mye vekt som må til for å få rett dypgang.

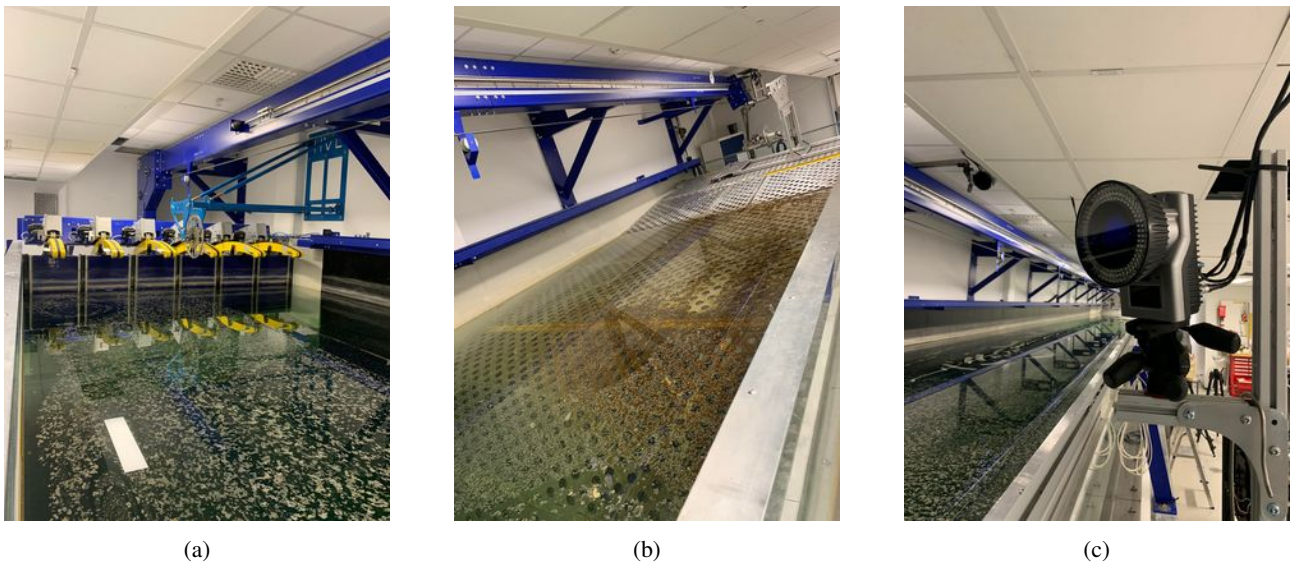
Først markeres ønsket dypgang på alle de tre søylene på modellen. Deretter settes modellen i den lille tanken på MarinLab og igjennom prosessen ved prøving og feiling ble det lagt til litt og litt vekt i hver av søylene for å oppnå rett dypgang. Det skal i utgangspunktet være like mye vekt i alle søylene, men etter glassfiber og polyester ble lagt på modellen var tyngdepunktet blitt litt forskjøvet. Tabell 6 viser hvordan modellen ble ballastert til slutt.

Tabell 6: Ballastvekter teoretisk v.s faktisk ballast.

Søylenummer	Teoretisk ballastvekt [g]	Faktisk ballastvekt [g]
1 [Tårn]	436	200
2	436	75
3	436	50

4 Eksperimentell metode

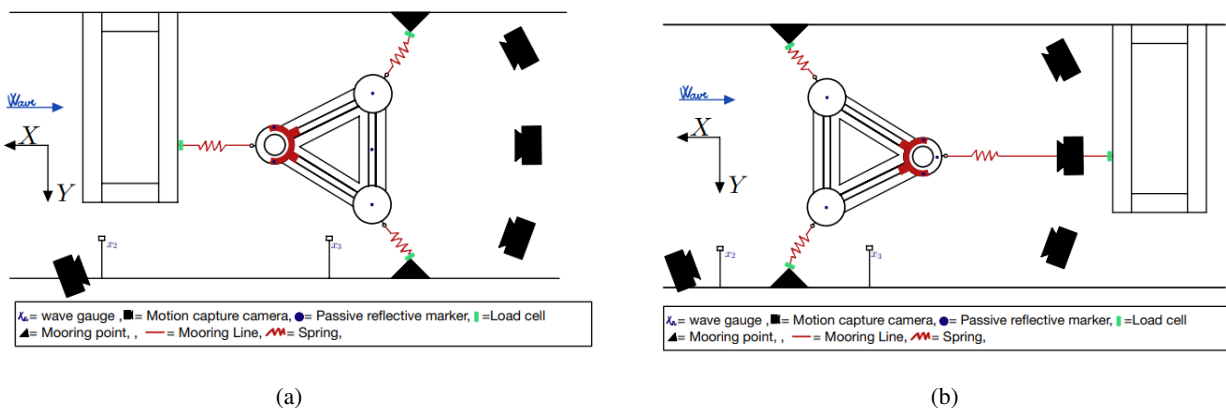
Testene på modellen utføres i slepetank på MarinLab ved HVL. Her vil testingen fokusere på å samle inn data for å verifisere at modellens bevegelser er lik bevegelsene som fra SINTEF Ocean. MarinLab ved HVL er 50m lang med en bredde på 3 meter og dybde på 2,2 meter (50 m x 3 m x 2.2 m). I enden av bassenget er det en strand (Figur 4a) som absorberer bølgene ved enden av tanken samt en bølgegenerator i motsatt ende (Figur 4b) med seks klaffer som kan generere en rekke forskjellige bølger, innens maskinens begrensninger på en strokelengde pp 0,5m. Rundt tanken er det montert et Qualisys motion capture system [17] som består av fire kameraer (Figur 4c) som fanger opp bevegelsene til modellen ved at det monteres små reflekterende baller på strategiske steder på modellen. Dette er koblet opp mot en hoveddatamaskin som brukes til å kontrollere bølgegeneratoren. Ved en igangsettelse av en bølge sendes det en puls til Qualisys systemet som begynner å logge data en gitt tid. Det sendes også en puls til LabVIEW som styrer datainnsamling som får alle dataene målt fra måleverktøyene som lastceller, slik at all data innsamling er synkronisert. LabVIEW styrer også programmer fra Edinburgh designs som kontrollerer slepevognen. Qualisys systemet har et eget program som samler inn data fra kameraene.



Figur 4: (a) Bølgegenerator i starten av bassenget, (b) Strand i enden av bassenget, (c) Et av fire qualisys kameraer

4.1 Oppsett i tank

Figur 5 viser oppsettet i slepetanken. Bølgemåleren som skal stå ved modellens flotasjonscenter, skal ligge ved $\frac{2}{3}$ av lengden fra søylen som står alene til de to som står på linje, se figur 5. Når bølgene treffer modellen vil modellen flytte seg, her blir det brukt Sintef OCEANs [3] rapport om fullskala og dens RAOer i jag-retningen. Dette gjør at man kan finne distansen som modellen vil bevege seg i jag-retningen. Dette tilsvarer 2-3 cm, så bølgemåleren skal stå $\frac{2}{3} + 3$ cm fra baugen i x-retning.



Figur 5: Oppsett i tanken, a) viser for et system hvor tårnet er vendt mot bølgegeneratoren 0 graders system, b) 180 graders system og tårnet vendt vekk fra bølgegeneratoren.

4.1.1 Forankring

For å unngå at modellen driver ut av posisjon i tanken, er den festet med en lett forankring. Dette vil si at oppgaven til forankringen er å holde den på plass når det utsettes for gjennomsnittlige bølgelaster i tanken og ikke til å bidra med økt stabilitet [18]. For å unngå at forankringslinene ikke bidrar med noe løft er de etter beste evne montert i samme høyde som innfestningspunktene på modellen, men de vil være festet noe høyere slik at forankringspunktene i tanken ikke kommer i kontakt med bølgene og forstyrrer dem. Dette vil også bidra til at det oppstår ikke lineære dragkrefter hvis linene faller i vannet. Forankringslinene består av et tynt tau som er festet i modellen og bassengkanten, deler av dette tauet er kuttet av og erstattet med fjærer som vil sørge for at modellen kan bevege seg samt unngå slakke liner som vil føre rykk. Denne fjærkonstanten er nedskalert fra fullskala Sima tester [3] ved

$$k_m = \frac{k_f}{\lambda^2}, \quad (21)$$

hvor k_m er fjærstivhet for modellen, k_f er fjærstivheten i fullskala og λ er skaleringsfaktoren. Etter at ønsket fjærstivhet er regnet $K = 8.98 \text{ N/m}$ ut testes det ut en rekke forskjellige konfigurasjoner av forskjellige fjærer for å oppnå ønsket fjærstivhet. Dette gjøres ved å måle hvor stor endring det oppstår på fjærlengden når en kjent vekt henges på, dette gjør det mulig å regne ut fjærstivheten

$$k_m = \frac{F}{\Delta L}, \quad (22)$$

hvor F er vekten som henges på og ΔL er forandring i fjærens lengde. For å sørge for økt nøyaktighet henges det først på 100 gram for å belaste fjæren samt foreta en måling på lengde endring før det henges på nye 100 gram. Ved å gjøre dette er det mulig å verifisere at lengde endringen er nøyaktig målt siden det er to målinger og å kontrollere at fjærstivheten er lineær.

Fra [9] kan man forvente en tilleggs masse i jag-retning lik 8.622 kg. Her med en ferskvanns tetthet lik $999.1026 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

4.2 Tester

I denne delen blir de ulike testene som ble kjørt fremlagt. Disse inkluderer decaytester, irregulære bølgetester (JONSWAP), hvit støy og Pullouttest.

4.2.1 Decaytest

En decaytest brukes til å finne dempningskoeffisienten til et forankringssystem da denne endrer den dynamiske bevegelsen til systemet. Ved å finne dempningskoeffisienten er det mulig å finne ut av hvor fort energien til systemet blir borte grunnet viskoelastisitet. Den utføres ved at modellen starter med å ligge i tanken i ønsket posisjon uten forankringslinjer, så utsettes modellen for en kraft som flytter den en distanse fra sin likevektsposisjon i heave, roll og pitch en etter en. Ved påføring av denne bevegelsen er det ønskelig at det kun er den ene bevegelsen som igangsettes selv om det ofte er umulig at det ikke oppstår noen andre bevegelser i tillegg. De svingningene som da oppstår måles med qualisys kamera og plottes. Etter at de tre frihetsgradene som er mulig å utføre uten forankring er gjennomført, festes modellen i forankringslinene i den posisjonen den skal være under videre testing. Siden det nå er en opprettende kraft som fører til at modellen ikke driver avgårde er det nå mulig å måle alle de seks frihetsgradene, dette gjøres på samme måte som uten forankring. Etter at testen er gjennomført vil være mulig å bruke den informasjonen som ble målt av qualisys systemet til å beregne hvor stor fjærstivhet hele forankringssystemet har og hvordan dette påvirker modellens bevegelser samt tilleggs masse. For dette brukes likning 23.

$$\omega_o = \sqrt{\frac{K}{\Delta + A_{11}}} \quad (23)$$

Der $\omega_o = 2\pi f_o$, f_o er egenfrekvensen til den forstyrte jag bevegelsen. K er fjærstivheten, Δ er deplasementet til modellen og A_{11} er tilleggs massen i jag-retningen.

Grunnen til at hiv, roll og pitch kjøres uten forankring er fordi disse har en tilbakevirkende kraft som vil få modellen tilbake til likevektsposisjon igjen. Dette vil si at stivheten vil være dominert av vannlinjearealet og ikke fjærstivheten.

4.2.2 Irregulær bølgetest

Testing for irregulær bølgetest kjøres ved hjelp av tre forskjellige JONSWAP spektre presentert i tabell 7.

Kjøringsnummer	H_s	T_p	γ	r
1	0.062	0.9	5	0.07
2	0.062	1.9	5	0.07
3	0.15	1.4	5	0.07

Tabell 7: Viser de forskjellige JONSWAP spektrene som blir kjørt

Disse kjøres når modellen er forankret. Dette er essensielle tester for sikkerhet når konstruksjonen står ute i havet. Her brukes qualisys systemet med en samplingsfrekvens på 100 Hz og bølgemålerene har en samplingsfrekvens på 120 Hz. Testene kjøres for en 3 timers sjøtilstand i fullskala, dette resulterer i en samplings periode på 23 minutter pluss 30 minutter i fullskala, tre minutter i modellskala er lagt til i starten for å få bassenget til å stabilisere seg. Det som er interessant å se på fra disse testene er RAO og respons kurvene som kommer fra disse irregulære bølgene og hvordan konstruksjonen håndterer disse værforholdene. Disse skal testes for både et 0 graders, 5a, system hvor søylen med tårnet står mot bølgegeneratoren, og et 180 - graders, 5b, system hvor søylen med tårnet står er vendt mot stranden.

4.2.3 Hvit støy (*Whitenoise*)

Hvit støy kan beskrives som en type støy innen et gitt frekvensområde. Innen hydrodynamikk kan hvit støy brukes til å beskrive tilfeldig variasjoner i bølger. Dette gjør at hvis man påfører konstruksjonen hvit støy signaler kan det simuleres tilfeldige variasjoner i bølger og strømforhold i et virkelig hav og dermed evaluere hvordan konstruksjonen reagerer på variasjoner.

Ved å la en variabel $X(t)$ beskrive bølgeenergien -og bevegelsen. Kan man beskrive en variabel som en sum av mange tilfeldige bidrag som er uavhengige av hverandre. Dette blir gitt ved

$$X(t) = \sum_{i=1}^N x_i(t), \quad (24)$$

hvor $x_i(t)$ er tilfeldige bidrag med uavhengige og identiske distribuerte i-verdier og N er antall bidrag som inngår i summen.

Ved å bruke Fourier-transformasjonen kan hvit støy beskrives i frekvensdomenet. Da er $S(f)$ frekvensspekteret til hvit støy som en konstant over alle frekvenser. Dette gjør det mulig beskrive hvit støy i frekvensdomenet til en konstant

$$S(f) = \sigma^2, \quad (25)$$

hvor σ^2 er variansen til det hvit støyet. For rapporten sin del vil det si at det gis en konstant signifikant bølgehøyde og at det skal kjøres alle frekvenser for denne bølgehøyden i 12 timer fullskala, en time og 23 minutter i modellskala.

4.2.4 Utrekningstest (*Pull – outtest*)

Ved å gjennomføre en pullouttest er det mulig å finne fjærstivheten til forankringen, den gjennomføres når modellen er plassert slik den skal være under testing og med de forankringene den har under testing. Modellen blir påført en last som trekker den vekk fra likestillingen. Ved å gjennomføre en slik test er det mulig å finne frekvensen til forankringssystemet ved å bruke kraften som modellen utsettes for og distansen modellen flytter seg og slik sørge for at det ikke sammenfaller med frekvensen til modellen.

4.3 Kalibrering

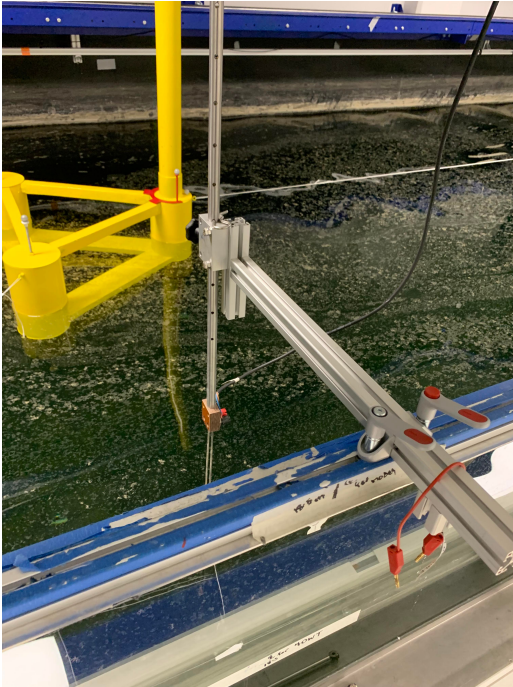
Før testene gjennomføres må instrumentene kalibreres. Dette sikrer nøyaktighet i måleresultatene. I dette avsnittet forklares det hvordan anvendte måleinstrument kalibreres.

4.3.1 Lastceller

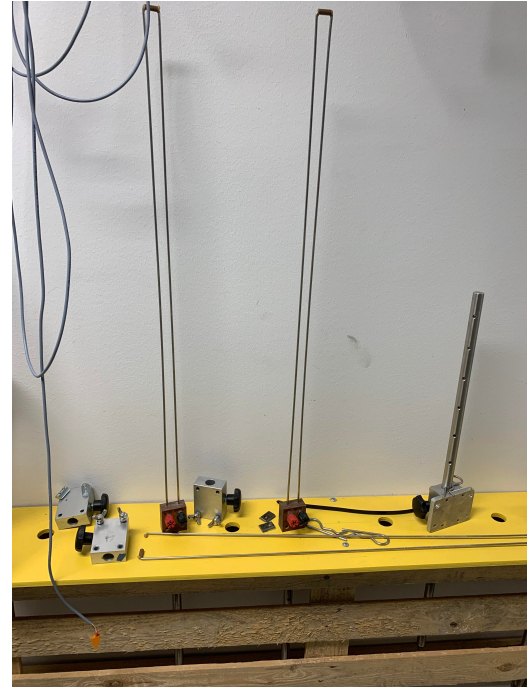
Kalibreringen av lastcellene skjer ved å henge lastcellen utenfor et fast punkt eller lignende. Deretter henges det på en last i form av masse, dette gjør at lastcellen kan måle vekten (massen * gravitasjon). Dette vil si at lastcellene blir kalibrert vertikalt. Massene blir hengt på to og to fra 0-10 kg. Dette gjøres fem ganger, det vil si at et lodd veier 1 kg. I LabView plottes en graf hvor det på y -aksen måles volt og på x -aksen måles kraften, $F = mg$. Disse verdiene plottes inn i MATLAB-skriptet i vedlegget, 49. Dette gjøres for alle 3 lastcellene. Figur 63 viser produsentens datablad for en av de tre lastcellene brukt. Her vises en hysteresis på ± 0.25 er innen kravet, det vil si at kalibreringen er ok i forhold til hysteresis kravet.

4.3.2 Bølgemålere

På likt vis som lastcellene skal det også gjøres en kalibrering av bølgemålerne som blir brukt, bølgemålerne regner bølgehøyden ved å måle motstanden de opplever fra vannet. Her finnes først plaseringen til bølgemålerene, en forstyrret, en ved modellen og en bak modellen. Bølgemålerne må være rene, det er viktig å kontrollere dette grundig, særlig når bølgemålerne har stått lenge i tanken. For dette tilfellet står bølgemålerene på 10m, 17m og 18.5m fra bølgegeneratoren.



(a)



(b)

Figur 6: (a) bølgemåler ved modell, (b) bølgemåler i Marinlab

I Wave control programmet startes kalibreringen ved å trykke på Calibration deretter settings for å bestemme hvor bølgemåleren skal beveges opp og ned fra sentral posisjonen. Deretter set resistance, her må bølgemålerene kortsluttes, koble fra kablene brukt til kortslutning når programmet sier det skal gjøres, skal det kalibreres flere bølgemålere samtidig er det en ledningen per måler som gjelder. Neste steg er å set gain deretter start kalibrering, følg instruksene på skjermen. Det er viktig at kallibreingsfilen lagres hvis det skulle oppstå komplikasjoner med kalibreingen, da kan denne lastes inn på nytt istedenfor at kalibreringen må gjentas.

4.3.3 Qualisys bevegelse måleutstyr

Det er også viktig å kalibrere området hvor Qualisys kameraene står, hvis dette ikke er gjort på en stund eller om noen av kameraene har skiftet posisjon. Dette gjøres med en kalibreringsstang, det er en enkel stang med to reflektorhylser på enden som viftes i området der modellen skal stå. For Qualisys systemet brukes det reflektorhylser for kamerane, det er totalt fem reflektorhylser. To av de på baugen, to av de på hekken og en som et offset punkt. Disse fem tilsammen lager bodyen til modellen. Fra figuren 5 så er det globale koordinatsystemet midt i tanken. Hekken skal ligge midt på denne x-en. Dette betyr at for Qualisys systemet må det tas utgangspunkt for reflektorhylsen på hekken og halvparten av distansen, 30.5 cm, i y-retningen. Det fører til en lokasjon midt på hekken. Videre tas den $\frac{2}{3}$ av distansen fra baugen til hekken. Deretter ned i vannlinjen. Det er her det lokale koordinatsystemet blir definert. Dette gjøres også for 180 graders systemet, her kjøres vognen mot strandenden av bassenget. Her er det samme prosedyre for Qualisys systemet for å definere det lokale koordinatsystemet

4.3.4 Edinburgh designs bølgegenerator

For kalibrering av bølgene er det viktig at tanken er tom når dette pågår. Edinburgh Designs har utviklet et program spesifikt for MarinLab. Det er to hovedprogrammer for bølgegeneratoren, Wave Synthesiser og Wave Runtime. Det første programmet tilater brukeren å spesifisere bølgene det er ønskelig å bruke til eksperimentene, deretter kjøres disse bølgene fra Wave Runtime programmet i en tom tank for å se om det målte spekteret er lik teoretiske spekteret, deretter blir en korrigerende gain satt inn for å komme nærmere det teoretiske spekteret. Er ikke gainen god nok, kjøres spekteret på nytt.

4.4 Feilkilder

Da modellen testes i en tank med flere forskjellige måleinstrumenter vil det alltid være noen momenter som kan føre til feilkilder i målingen, kalt systematiske feilkilder. Selv om dette kan være små utslag kan dette føre til betydelige utslag i målingene under postprosessen. Det prøves ikke å kvantifisere den totale feilmarginen fra målingene, da det er flere kilder som bidrar og dermed gjør det vanskelig. Det er også fare for tilfeldige feilkilder da modellen skal flyttes og snus på for hånd, selvom det er markeringer som skal gjøre dette så nøyaktig som mulig. Med tilgjengelig modell og nevnt måleutstyr forventes følgende hoved feilkilder:

- refleksjoner fra veggene
- feilmarginer fra lastceller, 63
- unøyaktighet ved oppsett av forankringslinjer, for stram, for slak, feil vinkler
- fri væskeoverflate
- ujevn overflate på modellen
- bølgehøydemålinger, typisk 0.1 prosent av kalibrerte lengde
- unøyaktig definering av koordinatsystem i Qualisys
- Nøyaktighet på kalibrering av instrumenter
- hysteres, i dette tilfellet -0.019 prosent

5 Resultater

Under resultatdelen av rapporten vil det bli fremlagt beregnet resultat opp mot teorien og figurer som viser de viktigste funnene og verdiene for de eksperimentielle forsøkene. Det vil også være flere figurer som vil legges ved i vedlegg 7, som kan ses på som mindre viktige funn og verdier.

5.1 Hydrostatiske resultater

Det første som skal ses på er Arkimedes lov om oppdrift. Det blir da brukt en tetthet (ρ) på vannet lik 999.1026 kg/m^3 som er tettheten for ferskvann ved en temperatur på 15 grader [19]. Da får vi en oppdrift lettskips på

$$\text{Oppdrift} = 13.8238 \text{ kg.} \quad (26)$$

Dette er ved en dypgang på 15.5 centimeter. Oppdriftskraften her er like mye som hele modellen sin vekt. Det vil si at dypgangen som er brukt i denne utregningen blir feil for lettskips. Så lettskips vil ikke modellen nå 15.5 cm i dypgang som den egentlig skulle. Dette er fordi Arkimedes lov fra seksjon 2.2 sier at det skal være likevekt mellom oppdrift og tyngde. Dette vil si at den nye dypgangen blir regnet frem ved hjelp av Arkimedes. Når det skrives ut hva det neddykket volumet er og har dypgangen T som ukjent vil det komme til å bli en ny dypgang lettskips på 3.3 centimeter. Vekten til modellen lettskips blir da 7.3116 kg.

Videre er det mulig å bruke denne nye dypgangen, vekten og tyngdepunktet til de forskjellige komponentene til å regne ut initialstabiliteten lettskips til modellen, uten ballast og tårn. Her blir det brukt teorien til seksjon 2.2. For variablene tabellen 2 under modell kolonnen. Det blir brukt en dypgang (T) på 3.3 centimeter. Da blir vannlinjearealet

$$A_{w0} = 1.91e + 3 \text{ cm}^2 \quad (27)$$

Fra dette finner man ∇ som blir

$$\nabla_0 = 6.3053e + 3 \text{ cm}^3, \quad (28)$$

Dette kan brukes til å finne flotasjonssenteret i x - og y -retning. Siden det er symmetri over x - og y -aksen vil det da også si at tyngdepunktet G ligger på samme koordinatene.

$$xF_0 = 13.3682 \text{ cm} \quad (29)$$

Siden floatasjonssenteret i y -retningen vil ligge midt på y -aksen vil $yF_0 = 0$ og det er likt areal på begge sider av aksene, da vil også $yG_0 = 0$. Fra ligning 29 blir det omtrent $\frac{2}{3}$ av avstanden oppi x -aksen som er der tyngdepunktet for en trekant skal ligge i henhold til [20]

Videre finnes KB_0 som er avstanden fra kjølen til oppdriftspunktet 2.2.

$$KB_0 = 3.4014 \text{ cm} \quad (30)$$

Dette skal brukes videre til å finne initial metasenterhøyden for å undersøke om flyteren er stabil eller ikke. Fra 2.2 må $GM > 0$ for å ha et stabilt skip.

Videre må man finne arealtreghetsmomentet.

$$Ix_0 = 2.0714e + 5 \text{ cm}^4 \quad (31)$$

Dette kan brukes til å finne avstanden fra oppdriftssenteret til metasenteret tverrskips. Siden geometrien er lik vil tverrskips og langsskips bli det samme. Da blir BMT_0 lik

$$BMT_0 = 32.0044 \text{ cm} \quad (32)$$

Videre finnes avstanden fra kjølen til tyngdepunktet

$$KG_0 = 15.2056 \text{ cm} \quad (33)$$

Dette gir GMT_0 som er lik

$$GMT_0 = 20.2003 \text{ cm} \quad (34)$$

Dette er altså større enn 0 som vil si at konstruksjonen lettskips skal være stabil. Disse utregningene er med i MatLab-skriptet lagt ved ???. Videre skal det testes for stabilitet ved fullballastert flyter og med tårn. Disse utregningene blir like som lettskips utregningene.

Det skal nå undersøkes om det blir stabilt ved dyppgang på 15.5. Dette er med mer vekt ifra tårnet, ballastvekter og gjengestag. Se tabell 8

Tabell 8: Vekter og avstand til tyngdepunkt.

Komponent	Vekt [kg]	Tyngdepunkt opp fra kjølen [cm]
Søyle	1.89326	15.5
Pongtong	0.30079462	2
Koblingsbro	0.2431434331	29.25
Tårn	1.623	86
Ballastvekt 2 og 3	1.623	4.3
Ballastvekt 1	0.436	8.98
Gjegestag 1	0.090	16.25
Gjegestag 2 og 3	0.122	20.5

Det nye neddykket volumet blir nå $1.569e+04 \text{ cm}^3$ og nye vannlinjearealet er 530.1438 cm^2 og den nye vekten blir 13.8226 kg . Det er samme prosedyre for å finne ut om modellen vil være stabil ved ballastert tilstand og med tårnet montert. Den nye avstanden fra kjølen til oppdriftssenteret blir da.

$$KB = 10.8012 \text{ cm} \quad (35)$$

Videre blir avstanden fra oppdriftssenter til metasenter funnet tverrskips. Da trenger først det nye arealtreghetsmomenten å bli funnet på grunn av endringen i vannlinjearealet

$$Ix = 1.9442e + 5 \text{ cm}^4 \quad (36)$$

Da blir BMT

$$BMT = 14.0515 \text{ cm} \quad (37)$$

Så blir avstanden fra kjølen til tyngdepunktet funnet, her brukes I_x for å finne nye KG . Dette blir da

$$KG = 20.4682 \text{ cm} \quad (38)$$

Den nye metasenterhøyden blir da

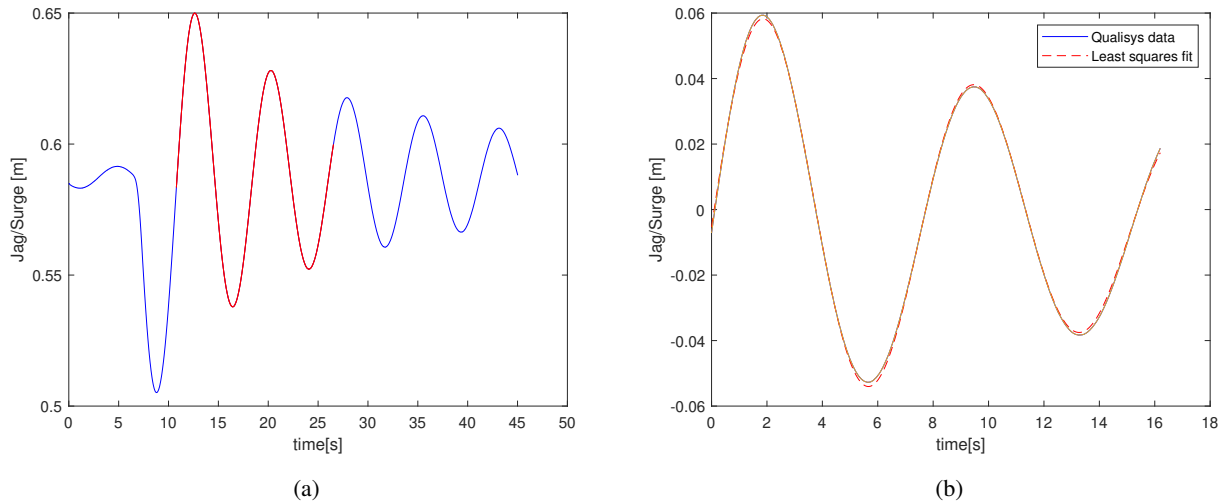
$$GMT = 4.3845 \text{ cm} \quad (39)$$

Dette er større enn 0 som vil si at modellen er ganske stabil når den er fullt ballastert og med tårnet på. Tyngdepunktet blir da liggende på $(13.3682, 0, 20.4682)$ fra kjølen. Skulle det være ønskelig å flytte tyngdepunktet opp til vannlinjen blir det da $(13.3682, 0, 4.968)$ som stemmer ganske bra med Sintef sin rapport. Dette er når koordinatsystemet ligger under søylen ved baugen, noe som er ugunstig for videre analyser, derfor burde koordinatsystemet flyttes til tyngdepunktet, da blir det $(0, 0, 4.968)$. Disse beregningene er det brukt forenklet geometri og mange av vektene er satt sammen til en større del istedet for å se på de hver for seg i alle sammenhenger. Dette gjør nok at det er viss usikkerhet rundt resultatene. Samtidig som det stemmer at metasenterhøyden skal gå ned når en konstruksjon blir ballastert, siden konstruksjonen senkes lengre ned i vannet, men likevell er det en positiv metasenterhøyde. Det skulle også ha blitt utført en krengeprøve for å bekrefte at KG er korrekt og for å bekrefte teoretiske resultatet med det virkelige.

5.2 Decaytester resultater

Her presenteres resultatene for decaytestene.

Decay tester for jag viser modellens bevegelser i x retning under decaytester, grafen og least square fit ser bortimot identiske ut i figur7. Siden disse er såpass like er dette data som trolig vil være gode nok til å bruke for å finne egenfrekvensen til modellen i jag. Dette brukes videre i matlab når RAO kurvene til modellen skal finnes under de forskjellige kjøringene. Figuren til venstre viser den fulle målingen i blått og den røde linjen viser hvor det er croppet for bruk i least square fit.



Figur 7: (a) Decay jag, forankret. Blå graf er hele måletiden, rød graf viser hvor det er kuttet, (b) decay jag med square fit, forankret.

Se vedlegg B for figurer for alle decay testene. Fra 4.2.1 skal det finnes tilleggsmassen i de forskjellige translasjonene og rotasjonene, egenfrekvenser og innvirkningen av fortøyningslinene fra decaytestene. Tabellen viser resultatene fra decaytestene, hvor frekvenser og dempningsforholdene ble målt for de ulike frihetsgradene. Utifra dette er det mulig å beregne tilleggsmassematrixen som kan gi en bedre forståelse om modellens bevegelser.

Frihetsgrad	Ikke forankret	f_0 [Hz]	f_d [Hz]	n [rad/s]	ζ [-]	Forankret	f_0 [Hz]	f_d [Hz]	n [rad/s]	ζ [-]
Jag	-	-	-	-	-	0.123	0.131	-0.046	0.069	
Svai	-	-	-	-	-	0.118	0.124	-0.040	0.053	
Hiv	0.603	0.613	-0.063	0.017	0.596	0.616	-0.123	0.33		
Rull	0.378	0.384	-0.041	0.017	0.410	0.415	-0.035	0.013		
Stamp	0.370	0.379	-0.054	0.023	0.396	0.405	-0.058	0.023		
Gir	-	-	-	-	-	0.405	0.415	-0.063	0.025	

Tabell 9: Viser frekvens og dempningsforhold ifra decay testene.

Ved bruk av ligning 23 kan vi skrive den om til å bli

$$A_{jk} = \frac{K}{(2\pi f_0)^2} - \Delta, \quad (40)$$

her er $K = 8.5$ N/m for bevegelsene som ikke har noen tilbakevirkende kraft, A_{11} , A_{22} og A_{66} plottes verdiene fra Figur 8 og deplasementet 13.8226 kg.

$$\begin{bmatrix} 0.4088 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.640 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & A_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -9.892 \end{bmatrix}$$

Figur 8: Tilleggsmassematrix

For å beregne de resterende tilleggsmassene behøves stivheten fra vannlinjen for hiv

$$K_{33} = \rho g A_{wl} = 493.1 \text{ N/m} \quad (41)$$

hvor ρ er tettheten til ferskvann nede i tanken,[19] ved 15 grader, g er gravitasjonsakselerasjonen og A_{wl} er vannlinje arealet. Videre må også denne stivheten for stamp finnes.

$$K_{55} = \rho g V z_B + \rho g I_{yy} = 331.5 \text{ Nm/deg}, \quad (42)$$

For rull blir det det samme som pitch bare rundt y -aksen

$$K_{44} = \rho g V z_B + \rho g I_{xx} = 326.3 \text{ Nm/deg}, \quad (43)$$

her er V volumet av hele flyteren, z_B er satt til KB fra 5.1, arealtrehetsmomentet blir ikke det samme siden koordinat-systemet nå er flyttet til tyngdepunktet. Dermed oppstår det nye arealtrehetsmoment

$$I_{xx} = -0.00321 \text{ m}^4, \quad (44)$$

$$I_{yy} = 0.00007 \text{ m}^4. \quad (45)$$

Disse verdiene blir da brukt i likning 40, dermed blir den nye tilleggsmassematrisen

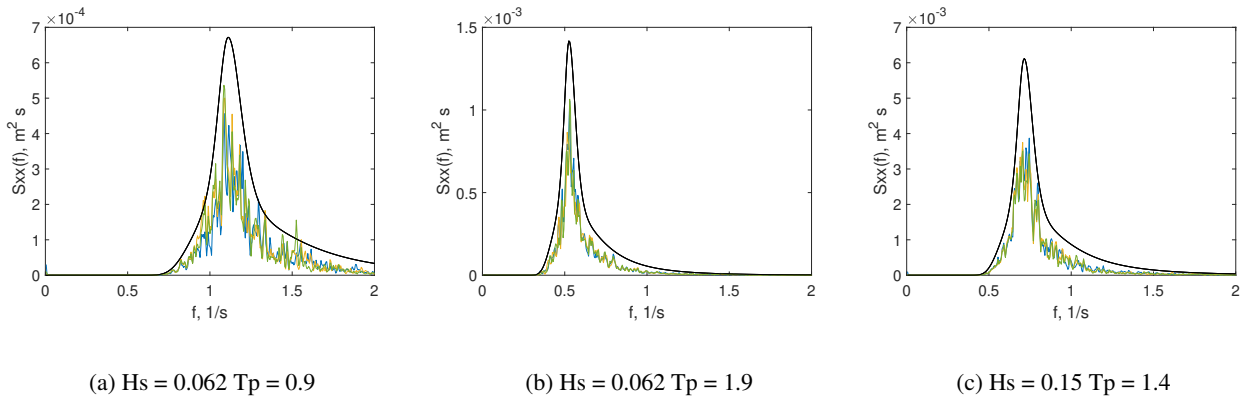
$$\begin{bmatrix} 0.4088 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.640 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 21.34 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 35.35 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 39.72 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -9.892 \end{bmatrix}$$

Fra denne matrisen kan det ses at tilleggsmassen i rull og stamp er svært høy, dette kan ha noe med beregningene å gjøre. Å regne stivheten til systemet for rull og stamp frekvensen er krevende uten noen form for numerisk analyse å sammenligne med. Det mest interessante med decaytest resultatene er å se på forankringslinene sin innvirkning på systemet, finne egenfrekvensene til translasjonene og rotasjonene og finne ut hvor mye dempning som er i systemet, noe som er presentert i 9. Det kan se ut til at disse forankringslinene er utenfor frekvensen til den tilbakevirkende kraften i hiv, rull og stamp, noe som er ønskelig for at stivheten i disse skal være fra den tilbakevirkende kraften og ikke ha forstyrresler fra fjærstivheten i forankringslinene. Dette ser ut til å stemme overens med 9 siden ikke forankret f_0 og forankret f_0 er nærmest like.

Tilleggsmasse matrisen sine verdier er veldig høye for stamp og rull og negativ for gir. Det at det er tilleggsmasse som er så høy i rull og stamp har nok noe med beregningene å gjøre, den er også litt høy i hiv noe nærmere teoretisk og eksperimentiell mulig. Det er også dette med å ha en negativ tilleggsmasse, det er fullt mulig teoretisk med en væske som har negativ masse, men dette stemmer ikke overens med hva slags væske som er nede i MarinLab.

5.3 Irregulære bølgetester

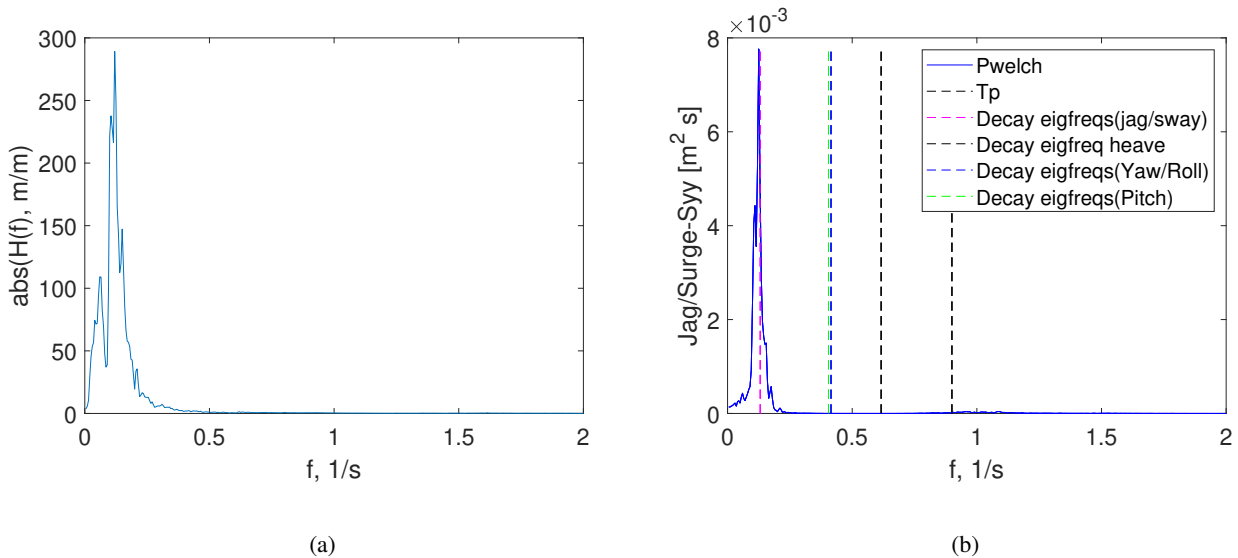
Fra seksjon 4.2.2 skal det ses på JONSWAP bølgetilstander korresponderende til tabell 7. Her er y -aksen S_{xx} som sier hvor mye energi det er i spekteret. I figur 9 er de forskjellige JONSWAP spektrene satt ved siden av hverandre. Fra figur 9 ser vi det teoretiske spekteret (den fine svarte kurven), samt det målte spekteret fra de forskjellige bølgemålerne. Dette er noe mindre på grunn av energitap til vegg og energitap til modellen. Det er tre forskjellige grafer som vises pluss det teoretiske spekteret. Dette er fordi det er tatt målinger fra tre bølgemålere, der alle vises i figuren. I testene er det valgt å kun bruke måledata fra bølgemåleren der modellen er plassert. Selv om disse ikke er plassert på samme sted, 4.1, så er energien i de nesten identiske, dette viser til at spekteret er tilnærmet likt før modellen, bak og der den er plassert. I alle tre tilfellene her er det målte spekteret godt nok til å brukes inn i postprosesseringsen videre.



Figur 9: Målt JONSWAP spekter for de forskjellige sjøtilstandene sammenlignet mot teoretisk spekter. Den svarte grafen er teoretisk spekter, de fargerike er målt spekter.

5.3.1 $H_s = 0,062$ $T_p = 0,9$ Angrepsvinkel = 0 grader

Her presenteres de mest interessante funnene for modellen i 0 graders systemet for det første JONSWAP spekteret. Her ble det tatt en beslutning på at det var jag bevegelsen som virket mest interessant på grunn av egenfrekvensen fra decaytestene i jag bevegelsen ligger nærmest å treffe peakenergien i responsen. Det er også tatt en beslutning på at egenfrekvensen til jag og svai er såpass like at disse kombineres til å lage en rett linje i figuren.

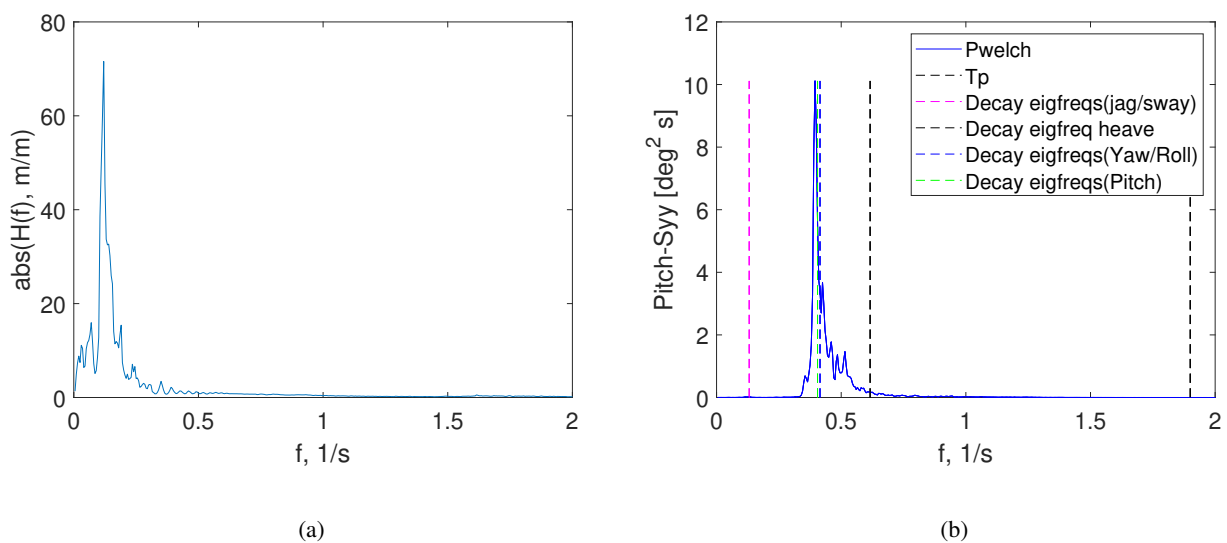


Figur 10: RAO og responspekter for jag-bevegelsen for JONSWAP $H_s = 0.062$ og $T_p = 0.9$. Figur a viser RAO og figur b viser responspekter.

Fra dette kan det virke som at det både er fare for resonans i jag og svai. Det er en liten tvil rundt disse resultatene for under testingen virket det som at modellen lå ganske rolig under denne sjøtilstanden. Også lasten i fortøyningslinene var stabile under denne sjøtilstanden uten at det oppstod rykkklaster.

5.3.2 $H_s = 0,062$ $T_p = 1,9$ Angrepsvinkel = 0 grader

I figur 11 er RAO og respons data fra et JONSWAP spekter med $H_s 0,062$ og $T_p 1,9$. Her er det mulig å se fra figur 11(b) at pitch og svai til modellen ligger i et område hvor det kan oppstå resonans hvis grafene sammenlignes med bølgespekteret i figur 9. Det er flere muligheter til at modellen ligger i dette område som burde undersøkes nærmere ved videre testing.



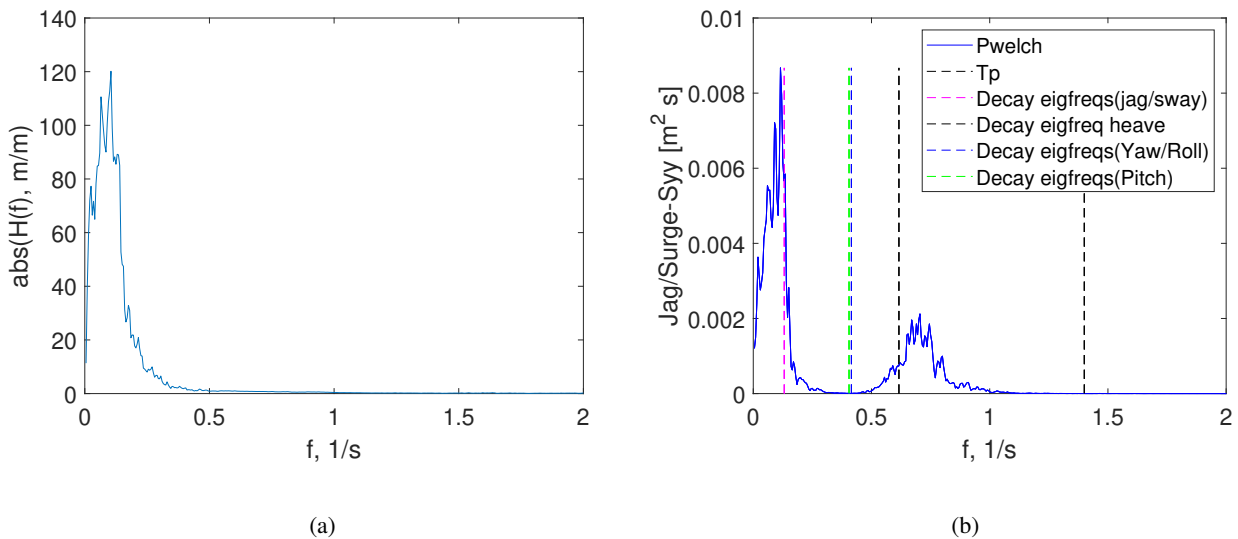
Figur 11: RAO for modellen ved et JONSWAP spekter med $H_s 0,062$ og $T_p 1,9$ hvor bølgene kommer fra 0 grader. Figur a viser RAO for jag, figur b viser responsen

Disse resultatene viser at rotasjonene er i en større fare for resonans i dette spekteret enn translasjonene. Dette kan ha noe med å gjøre at det er en veldig kunstig form for vindturbin som står på modellen, det kunne vært en fordel å byttet ut

tårnet og satt inn et mindre og kunne hatt en nacelle som er mer lik virkeligheten. Dette gjør at andreordensmomentene hadde vært mer riktig i forhold til virkeligheten. Det er også være at rotasjonene er i resonansområde enn translasjonene fordi dette kan føre til at hele konstruksjonen faller om. Det kan da være en fordel å se nærmere på hvordan konstruksjonen vil bevege seg i større sjø.

5.3.3 $H_s = 0.15$ $T_p = 1.4$ Angrepsvinkel = 0 grader

I figur 12 vises RAO og responsen for modellen ved innkommende bølger fra en vinkel på 0 grader. Hovedfokus fra denne testingen er å undersøke opp mot resonans og hvordan modellen ligger i en irregulær sjøtilstand med $H_s = 0.15$ og $T_p = 1.4$ som tilsvarer en $H_s = 15$ m og $T_p = 14$ i fullskala. Dette kan det se ut til å være fare for fra 141b.

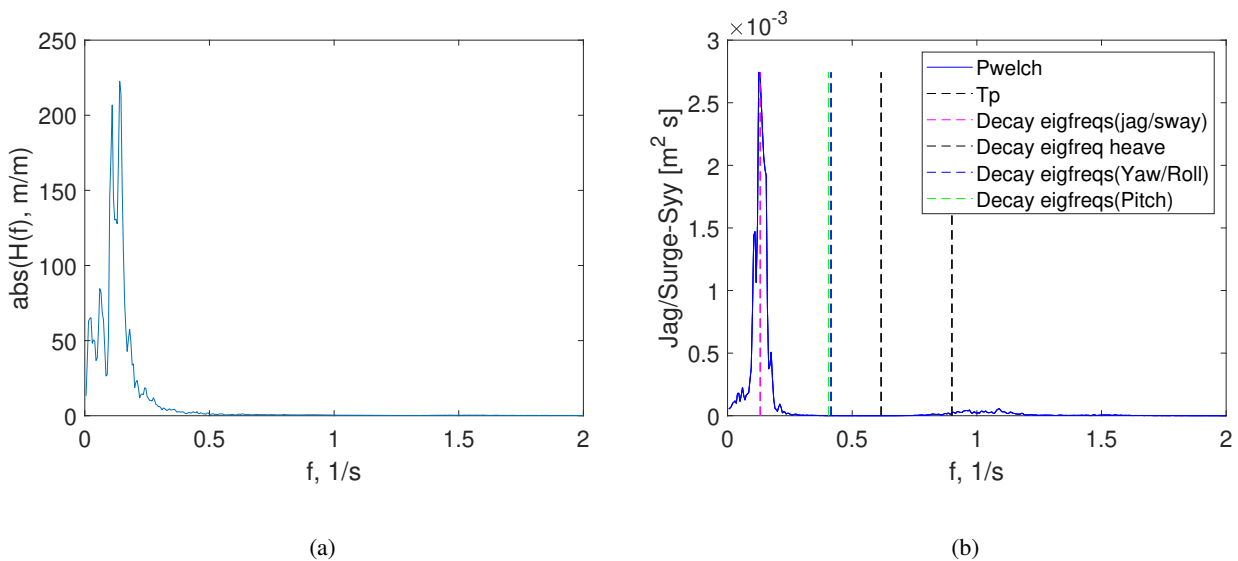


Figur 12: RAO for modellen ved et JONSWAP spekter med H_s 0,15 og T_p 1,4 hvor bølgene kommer fra 0 grader. Figur a viser RAO for jag, figur b viser responsen

Resultatene fra figurene 12

5.3.4 $H_s = 0,062$ $T_p = 0,9$ Angrepsvinkel = 180 grader

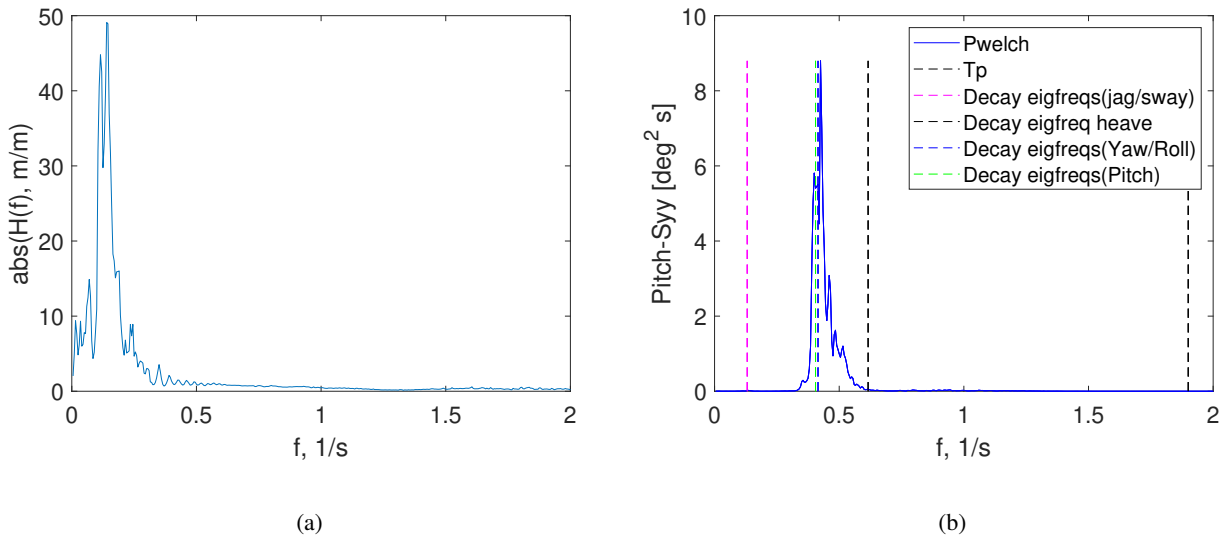
Figur 13 er lik som figur 10 med innkomende bølger fra 180 grader istedenfor 0 grader. Det vil ikke være fare for resonans i jag ved dette spekteret



Figur 13: RAO for modellen ved et JONSWAP spekter med H_s 0,062 og T_p 0,9 hvor bølgene kommer fra 180 grader. Figur a viser RAO for jag, figur b viser responsen

5.3.5 $H_s = 0,062$ $T_p = 1,9$ Angrepsvinkel = 180 grader

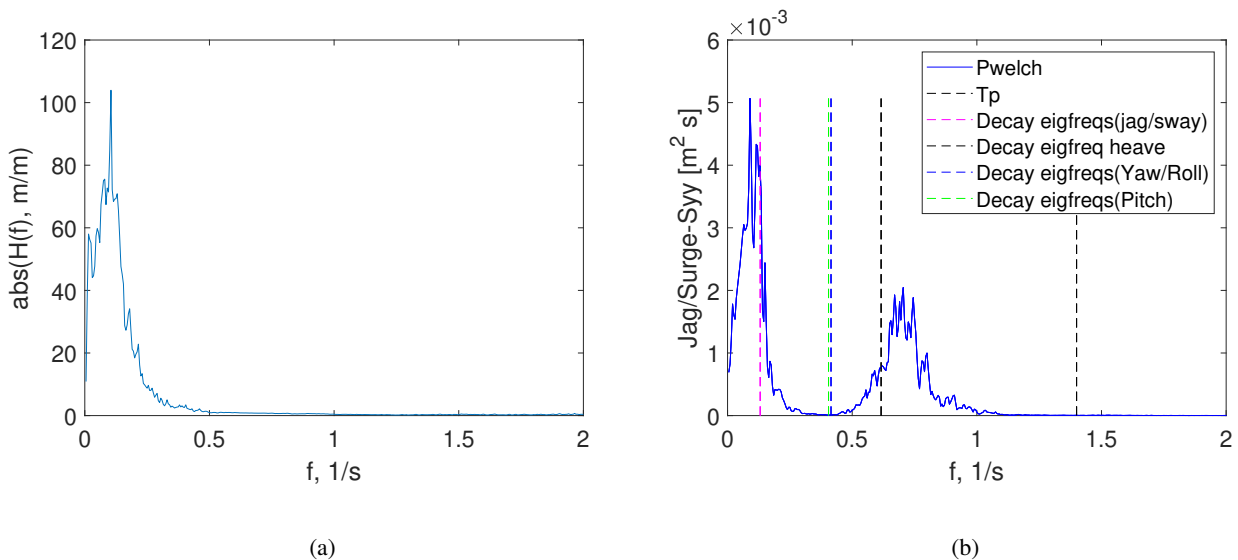
I figur 14 er det mulig slik som i figur 11 å observere at pitch og swai ligger i et område hvor det er fare for resonans. Her er det hensiktsmessig å utforske grunnen til at modellen ligger i dette området ved videre testing.



Figur 14: RAO for modellen ved et JONSWAP spekter med H_s 0,062 og T_p 1,9 hvor bølgene kommer fra 180 grader. Figur a viser RAO for jag, figur b viser responsen

5.3.6 $H_s = 0,15$ $T_p = 1,4$ Angrepsvinkel = 180 grader

Figur 15 er lik som figur 12 med innkomende bølger fra 180 grader istedenfor 0 grader. Det vil ikke være fare for resonans for dette spekteret.

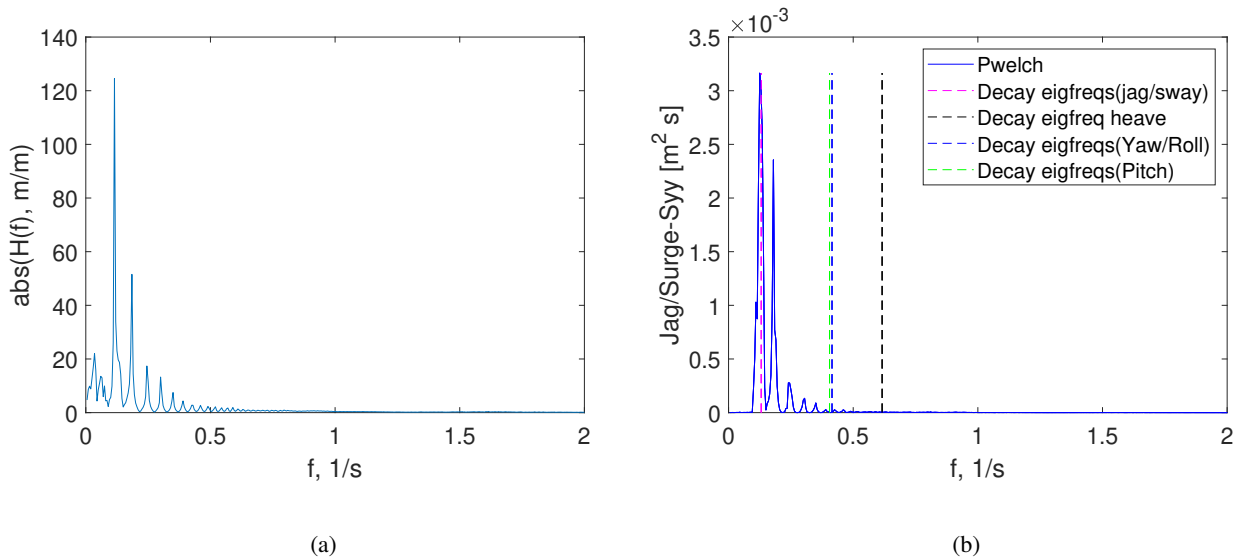


Figur 15: RAO for modellen ved et JONSWAP spekter med H_s 0,15 og T_p 1,4 hvor bølgene kommer fra 180 grader. Figur a viser RAO for jag, figur b viser responsen

5.4 hvit støy

5.4.1 $H_s = 0,02$ $F_{rec} = 0,05 - 2,0$

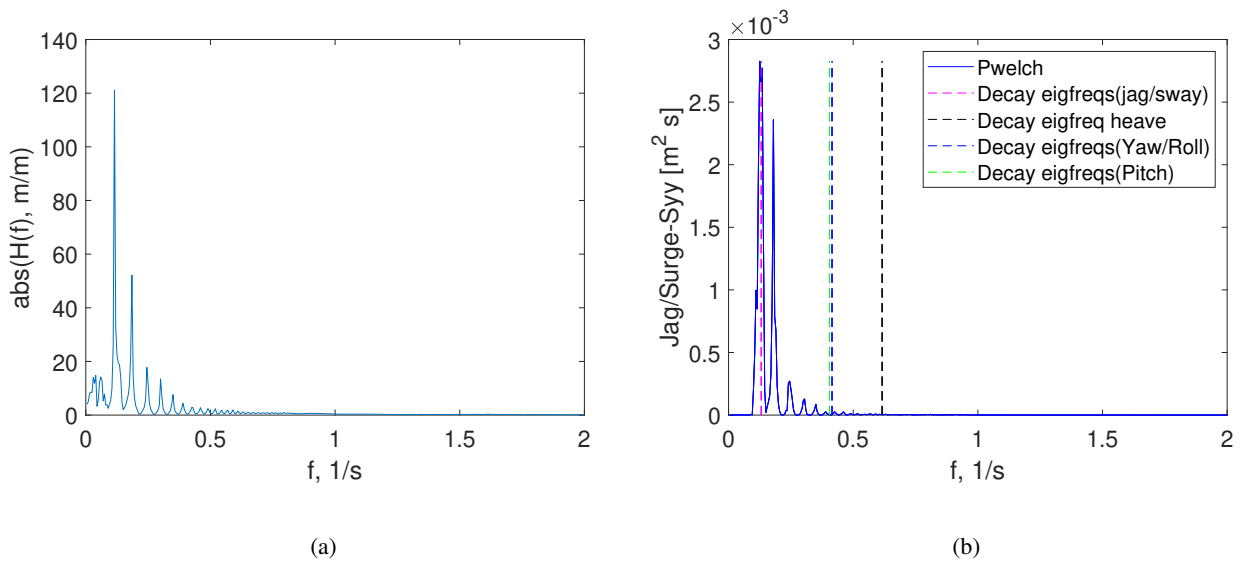
Under i figur 16 er det representert figurer som viser modellens bevegelser ved en hvit støy test.



Figur 16: RAO for modellen ved en hvit støy test med H_s 0,02 og frekvens 0,02-2 hvor bølgene kommer fra 0 grader. Figur a viser RAO for jag, figur b viser responsen

5.4.2 $H_s = 0,02$ Frec = 0,2 - 2,0

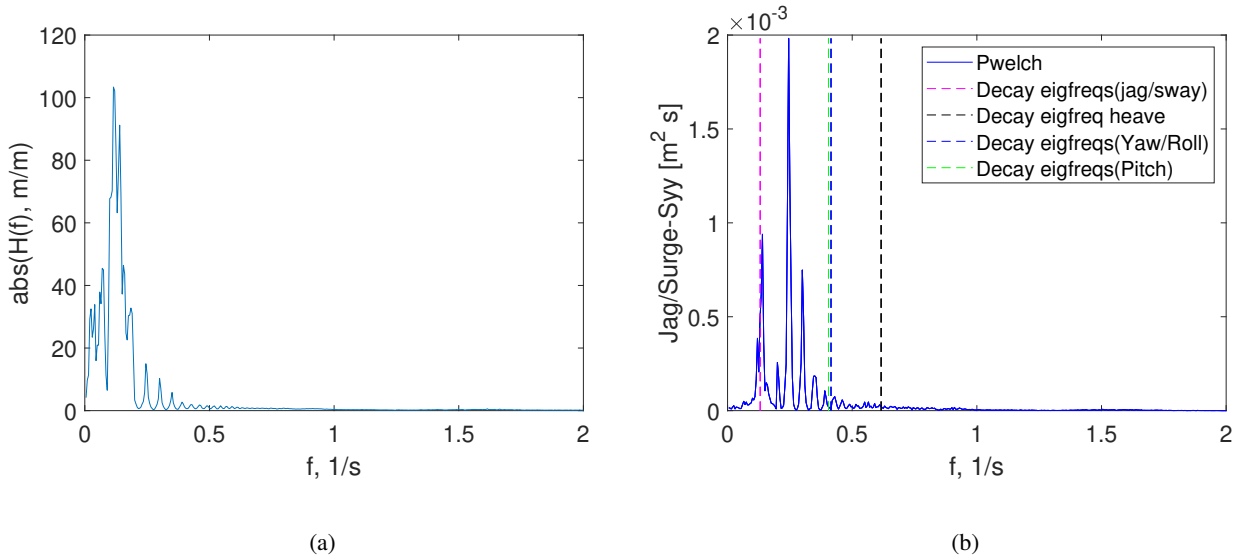
Under i figur 17 er det representert figurer som viser modellens bevegelser ved en hvit støy test.



Figur 17: RAO for modellen ved en hvit støy test med H_s 0,2 og frekvens 0,2-2 hvor bølgene kommer fra 0 grader. Figur a viser RAO for jag, figur b viser responsen

5.4.3 $H_s = 0,04$ Frec = 0,2 - 2,0

Under i figur 18 er det representert figurer som viser modellens bevegelser ved en hvit støy test.

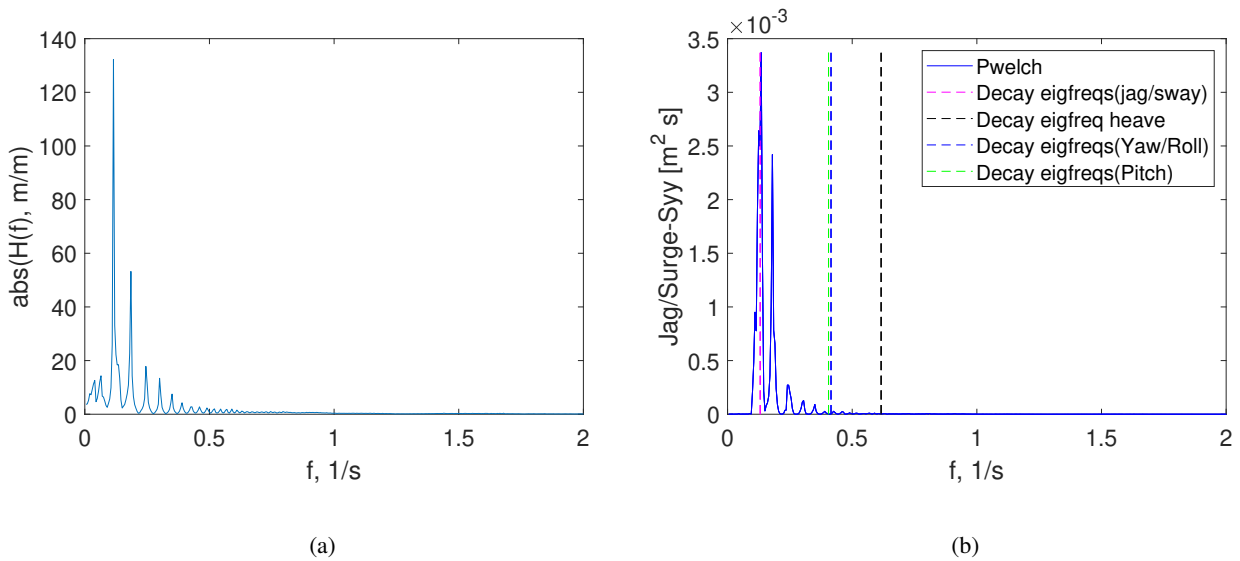


Figur 18: RAO for modellen ved en hvit støy test med H_s 0,04 og frekvens 0,04-2 hvor bølgene kommer fra 0 grader. Figur a viser RAO for jag, figur b viser responsen

5.5 Hvit støy 180 graders system

5.5.1 $H_s = 0,02$ Frec = 0,05 - 2,0

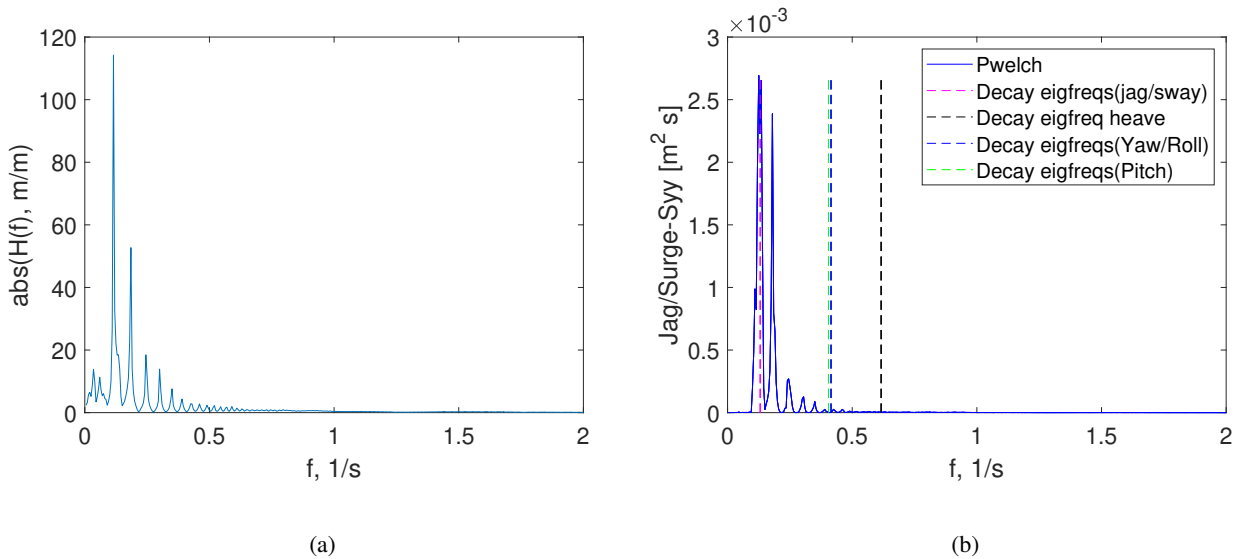
Under i figur 19 er det representert figurer som viser modellens bevegelser ved en hvit støy test.



Figur 19: RAO for modellen ved en hvit støy test med H_s 0,02 og frekvens 0,02-2 hvor bølgene kommer fra 180 grader. Figur a viser RAO for jag, figur b viser responsen

5.5.2 $H_s = 0,02$ Frec = 0,2 - 2,0

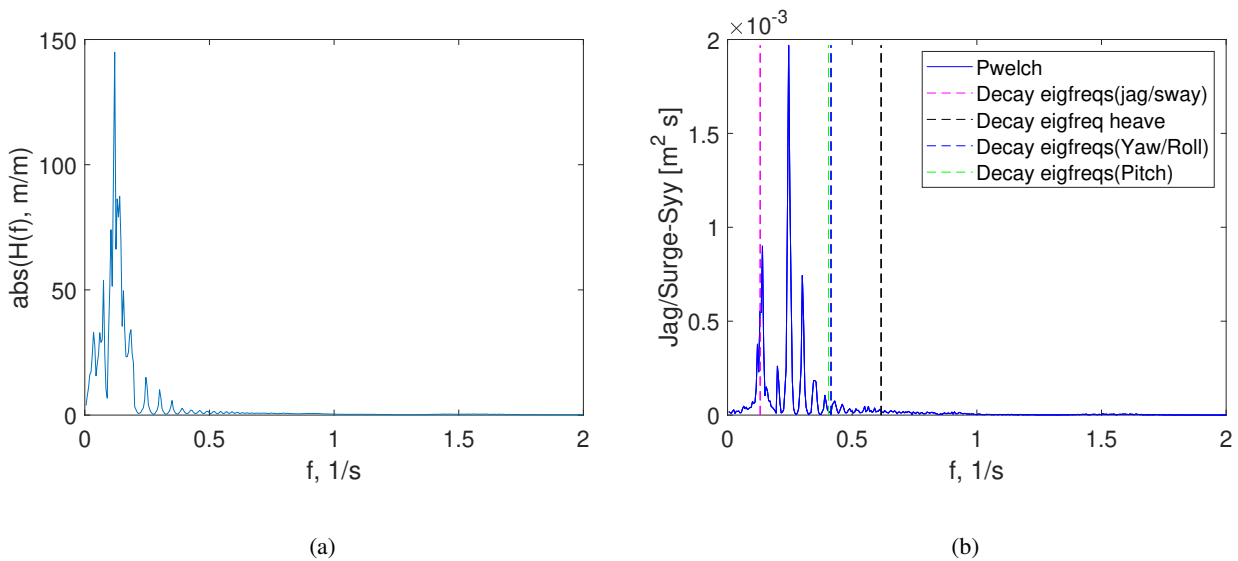
Under i figur 20 er det representert figurer som viser modellens bevegelser ved en hvit støy test.



Figur 20: RAO for modellen ved en whitenoise test med H_s 0,2 og frekvens 0,2-2 hvor bølgene kommer fra 180 grader. Figur a viser RAO for jag, figur b viser responsen

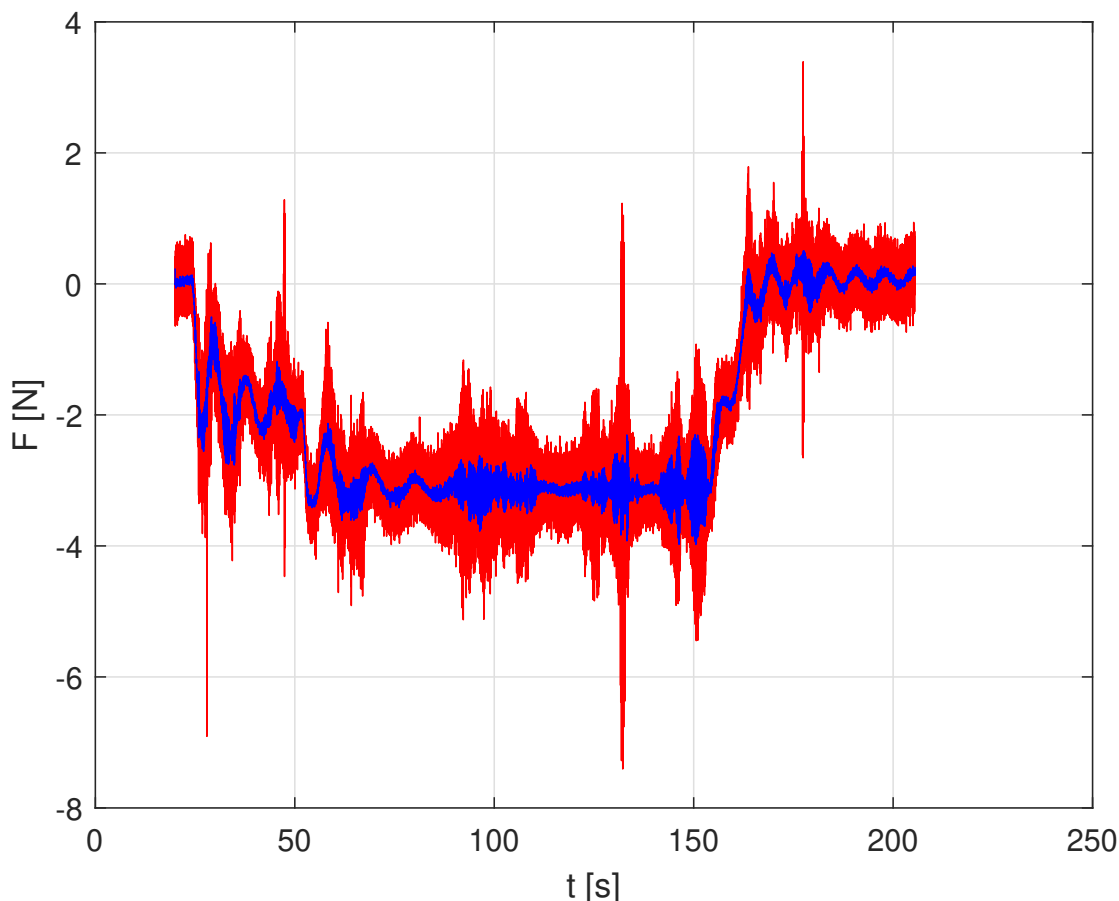
5.5.3 $H_s = 0,04$ Frec = 0,2 - 2,0

Under i figur 21 er det representert figurer som viser modellens bevegelser ved en hvit støy test.



Figur 21: RAO for modellen ved en hvit støy test med H_s 0,04 og frekvens 0,04-2 hvor bølgene kommer fra 180 grader. Figur a viser RAO for jag, figur b viser responsen

Siden lastcellen ble nullstilt etter montering av modellen før forspenningen ble målt via lastcellene ble dette gjort i etterkant. Det blir tatt målinger fra forankringen var stram og mens den blir slakket før den ble strammet opp igjen. Figur 22 viser tydelig hvordan lastcellen ble avlastet mens forankringen ble slakket, før den ble påført en last igjen ved oppstramming av forankringen. Det er mulig å se ut ifra grafen her at forankringen har en forspenning på litt over 3 newton som tilsvarer en kraft på 0,3 kg. Siden denne målingen er gjort ved å flytte det ene innfestningspunktet til forankringen ved bruk av en slepevogn er det noe svingninger i kraften etter at innfestningspunktet ble returnert til originalposisjonen sin. Dette skyldes at bevegelsen av vognen også startet en bevegelsen på modellen som da bevegde seg noe i takt med egenfrekvensen sin. Ved en ny liknende test ville målingene ikke blitt avsluttet like tidlig, slik at modellen får bedre tid til å stabilisere seg.



Figur 22: Test av forspenning

6 Konklusjon

Byggingen av modellen har i stor grad gått smertefritt, selv om det underveis har oppstått noen forsinkelser som ikke var medregnet i tidsplanen. Modellen ble en rigid modell som tåler belastninger utover det testene som ble gjennomført påførte den og den virker solid nok til at ingen av de testene som kan være aktuelle i fremtiden vil påføre modellen så store strukturelle laster at den deformeres.

Det var et delmål å bygge modellen modularer til en viss grad slik at det i fremtiden er mulig å bruke den til å teste andre vindturbiner på med ulik høyde og vekt. Slik modellen er bygd nå er dette mulig ved å bytte ut tårnet, ballasten og ved å lage en ny krage som tårnet festes i. I etterkant virker det som om dette var et lurt delmål da det tårnet som nå står på modellen er i overkant tungt, som igjen vanskeliggjør det å feste ballast i toppen.

Resultatene fra testene er i stor grad gode, selv om modellen er i område for resonans for noen JONSWAP spektre. Dette er spesielt for pitch hvor den innkommende bølgen har en H_s på 0,062 og T_p på 1,9. I de resterende JONSWAP spektrene og hvit støy testene ser det ikke ut som at det vil være en fare for at modellen opplever resonans med de innkommende bølgene. Det er flere faktorer som kan spille inn på hvorfor modellen havnet i dette området, men en hypotese som burde undersøkes ved videre forsøk er med et lettere tårn som har ballast i toppen for å simulere en nacelle. Dette vil påvirke tregheten til modellen og muligens føre til at RAO for pitch øker eller minker slik at faren for resonans minker.

Alt i alt sees prosjektet på som vellykket og som det har kommet mye god læring fra både teoretisk og praktisk. Det at ikke alt av tester ble gjennomført sees ikke på som en mangel, men heller en mulighet til å lære mer av modellen i fremtiden.

7 Videre arbeid

Det er behov for at det jobbes videre på modellen ut ifra de testene som er representert i denne rapporten. Det var ikke alt av forsøk som det ble tid til å gjennomføre grunnet at byggeprosessen tok lenger tid enn planlagt. Hadde alle forsøkene blitt gjennomført hadde det vært særdeles liten tid til å evaluere resultatene. Dette åpner opp for muligheter til videre testing der modellen kan optimaliseres ut ifra de testene som allerede er gjennomført. I første omgang ville dette trolig vært å bytte ut tårnkonstruksjonen og kjøre de forskjellige JONSWAP spektrene på nytt for å undersøke om det oppstår

fare for resonans. Det er også muligheter for å eksperimentere med forankringen for å se om det påvirker modellens bevegelser under bølgelaster i stor grad. Det blir også interessant å se nærmere på forankringslastene under de irregulære sjøtilstandene.

Her anbefales det å konstruere et nytt lettere tårn til modellen slik at det er muligheter for å ballastere i toppen av tårnet. Dette vil føre til at treghetsmomentet og gyrasjonsraten til modellen øker. Siden dette endrer modellens bevegelser bør det utføres en bifilar suspensjon [21] test etter montering av nytt tårn. For testing i tank er det aktuelt å teste for flere bølgespektre og fra forskjellige innkommende vinkler på modellen.

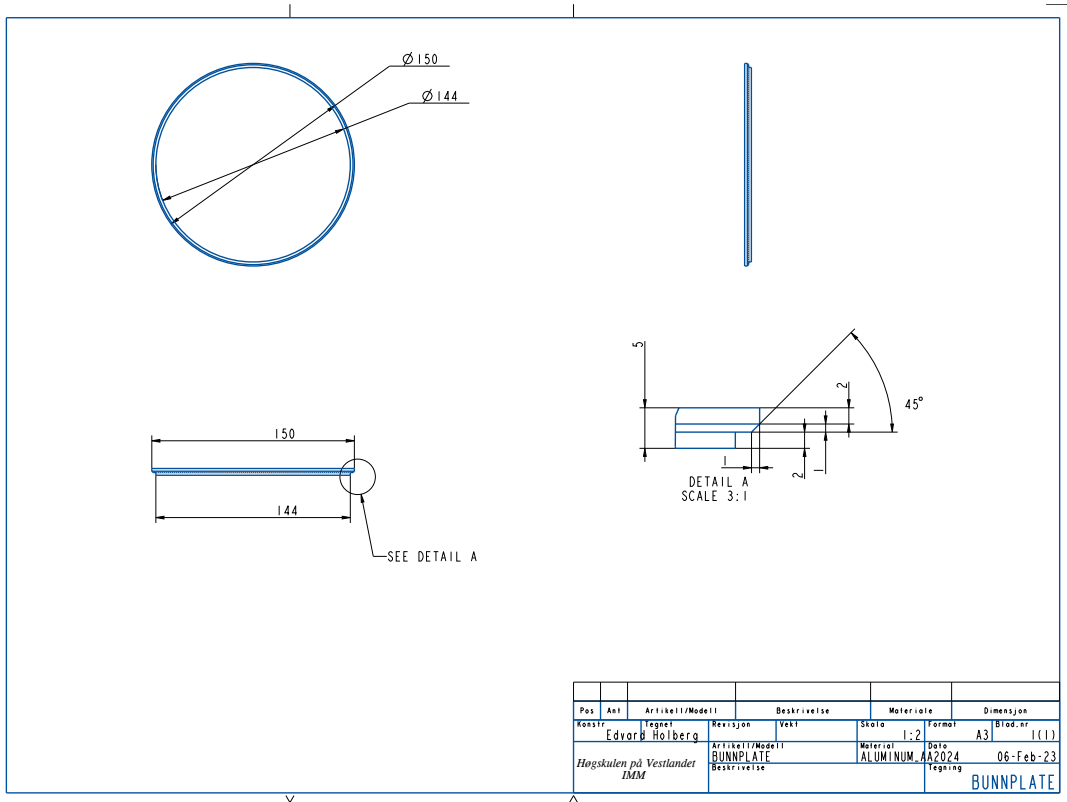
Disse testene bør sammenlignes opp imot numeriske analyser fra et analyse program. Her må denne analysen lages ved å bruke finite element, et slik program kan være Sesam. Ved å sammenligne målingene fra testene kan dette brukes til sammenligning og verifisering opp imot den numeriske analysen. Hvis disse stemmer overens er det mulig å bruke analysen til å analysere karakteristikken til modellen med forankringsliner som er forankret i havbunnen fremfor å være forankret i veggen på bølgetanken. Her er det også mulig å legge inn rotor diameter for turbinen på modellen, slik at vindlasten kan simuleres og brukes i beregning. Det hadde vært ønskelig å konstruere en metode for å påføre modellen en jevn vindlast mens den ble utsatt for forskjellige bølgespektre for å se hvordan dette ville endret bevegelsene til modellen. Dette vil være spesielt interessant ved vindhastigheter nær det turbinen er konstruert for, dette vil føre til den største kraften på modellen fra vinden samtidig som det er ved disse vindhastighetene det blir generert størst bølger. En slik type test må gjøres uten at oppsettet for vindlast utsetter modellen for rykk, men heller har en jevn last over hele bevegelsesmønsteret.

Referanser

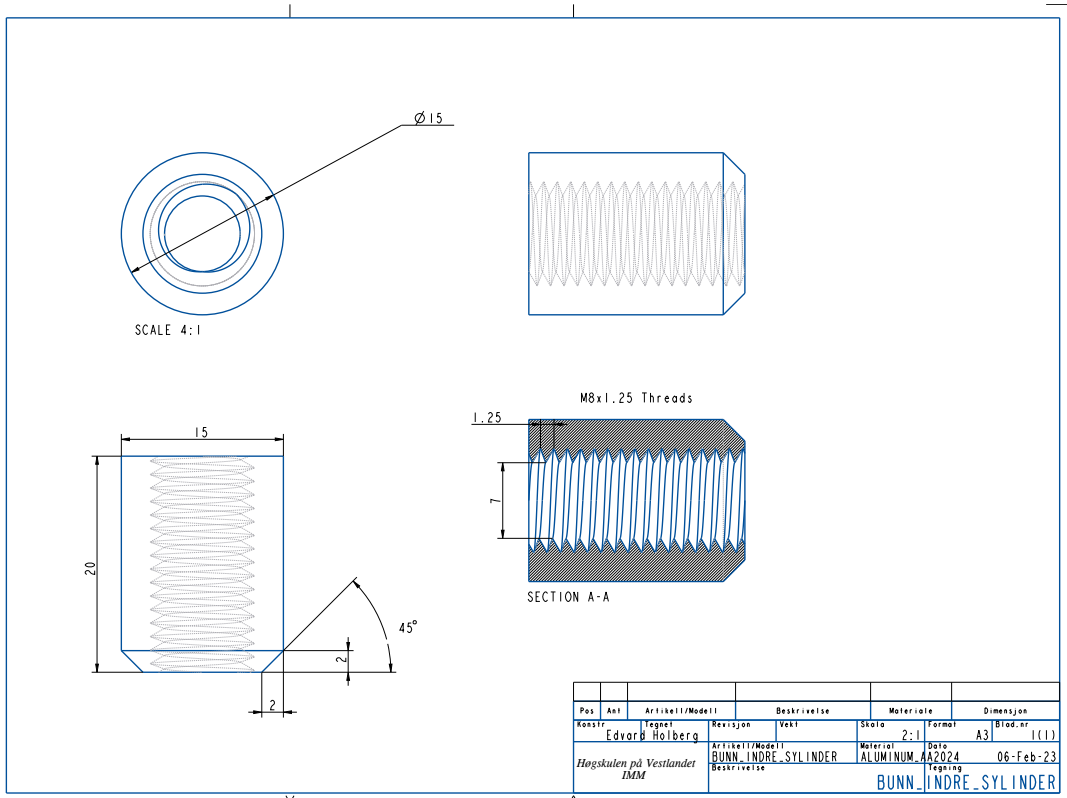
- [1] FN. FNs bærekraftsmål.
<https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal>, April 2023.
- [2] Equinor ASA. Floating wind Industrialising floating offshore wind.
<https://www.equinor.com/energy/floating-wind>, January 2014.
- [3] Sintef Ocean. Definition of the INO WINDMOOR 12 MW base case floating wind turbine.
<https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2772738>, 2021.
- [4] Sverre Steen. Experimental Methods in Marine Hydrodynamics,. FACULTY OF ENGINEERING SCIENCE AND TECHNOLOGY, 2014. TRONDHEIM, NORWAY.
- [5] Subrata Kumar Chakrabati. *Modeling laws in Ocean Engineering*. Gulf publishing Company, in Developments in Offshore Engineering, Wave Phenomena and Offshore Topics, 1999.
- [6] A.B. Biran. *Ship Hydrostatics and Stability*. Butterworth-Heinemann, 2003.
- [7] O. M. Faltinsen. *Sea loads on ships and offshore structures*. Cambridge University Press, Transfer functions and white noise testing, 1990.
- [8] K. Hasselmann. *Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)*. Deutsches Hydrographisches Institut,
<http://resolver.tudelft.nl/uuid:f204e188-13b9-49d8-a6dc-4fb7c20562fc>, 1973.
- [9] Det Norske Veritas. Modelling and analysis of marine operations, 2017.
- [10] William D. Callister and Rethwisch David G. *Materials Science and Engineering*. Jhon Wiley Sons Inc, 2020.
- [11] Microstep. Plasmacutter.
<https://www.gindumac.com/product/microstep-microcut-p-3001.15-p2BpLV-PLA-MIC-2006-00001>, 2023.
- [12] QUASER. Cnc - fres.
<https://utemac.eu/wp-content/uploads/2018/03/quaser-mv-154-pl-12.pdf>, 2023.
- [13] Doosan. Cnc - dreiebenk.
<https://www.machinedeal.com/en/cnc-lathes-3-axes/lynx-220-lm-1253255/>, 2023.
- [14] Flashforge. 3d printer.
<https://www.flashforge.com/product-detail/flashforge-adventurer-4-3d-printer>, 2023.
- [15] PTC. Creo® parametric toolkit user's guide.
<https://support.ptc.com/images/cs/articles/2018/05/1525425932uNM3/tkuse.pdf>.
- [16]
- [17] Qualisys AB. User Manual.
<https://usermanual.wiki/buckets/85617/1437169750/QTm-user-manual.pdf>, 2018.
- [18] Subrata Kumar Chakrabati. *HANDBOOK OF OFFSHORE ENGINEERING*. Offshore Structure Analysis, Inc, Plainfield, Illinois, USA, 2005.
- [19] Quality system group of the 28th Group. Fresh water and seawater properties, 2011.
- [20] House of Math. Tyngdepunkt og medianene. <https://www.houseofmath.com/no/encyclopedia/geometri/figurer-i-planet/trekanter/skjaeringssetningene/tyngdepunkt-og-medianene>.
- [21] Gregorio Iglesias Deborah Greaves. *Wave and Tidal Energy*. John Wiley Sons Ltd, 2018.

Vedlegg

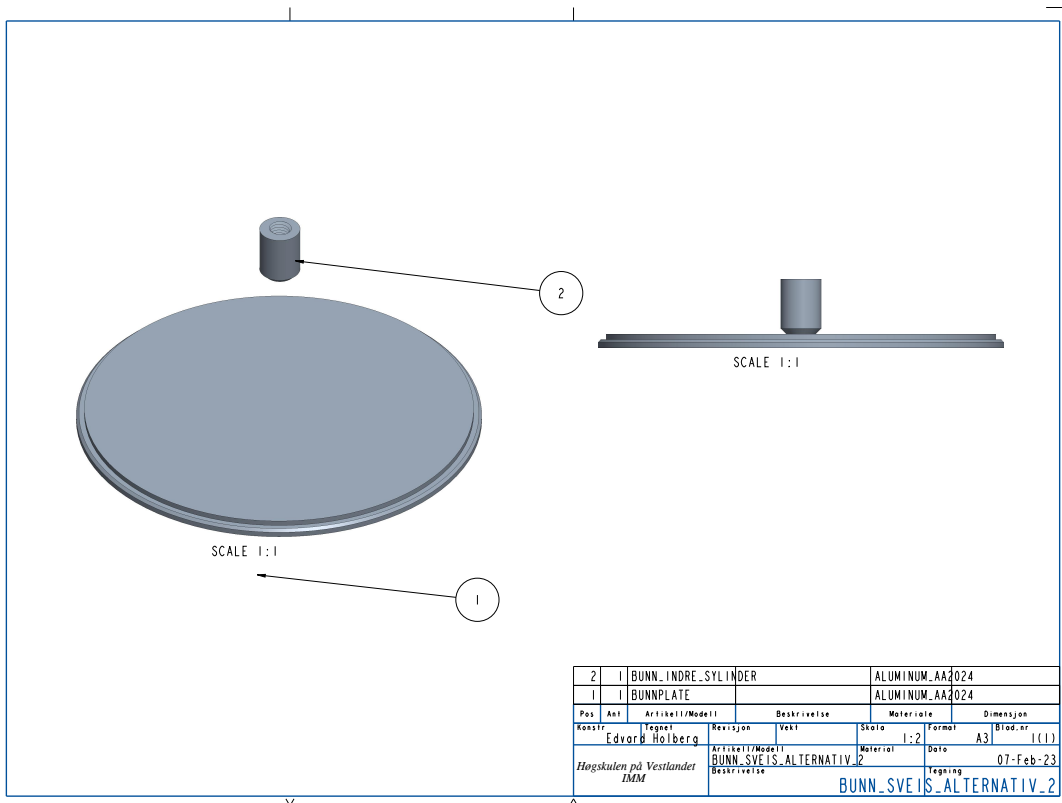
Vedlegg A: Tegninger



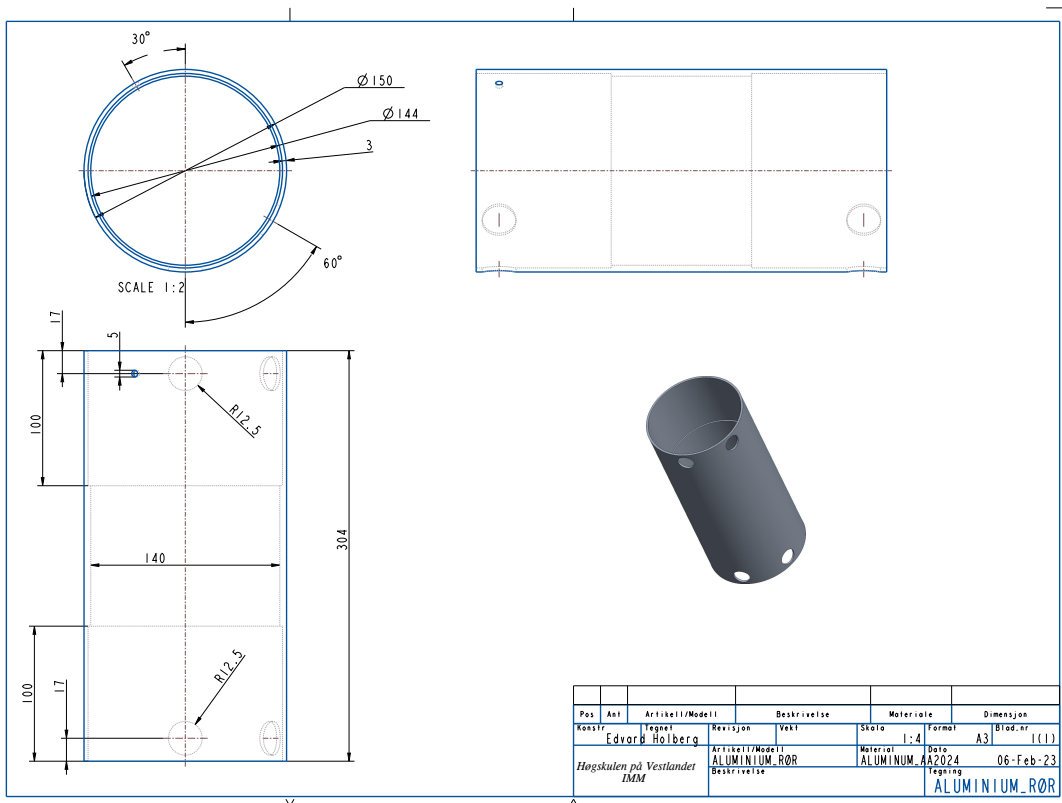
Figur 23: Bunnplate. (Komponent)



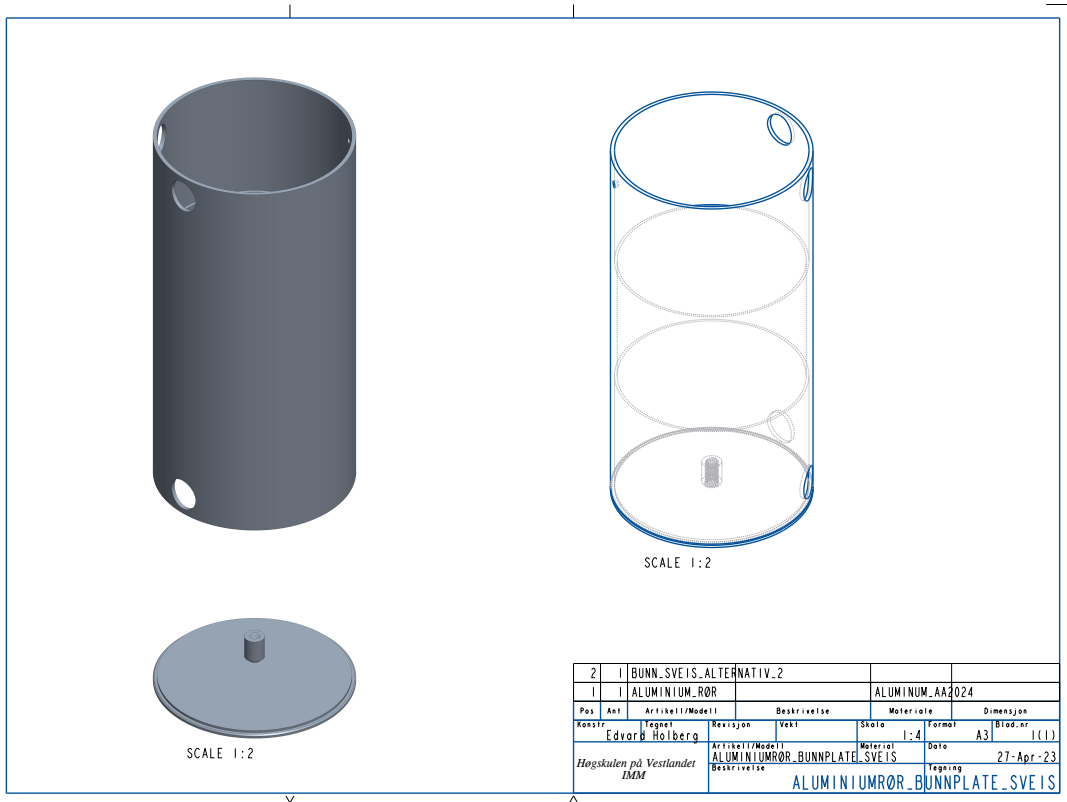
Figur 24: Bunn indre sylinder. (Komponent)



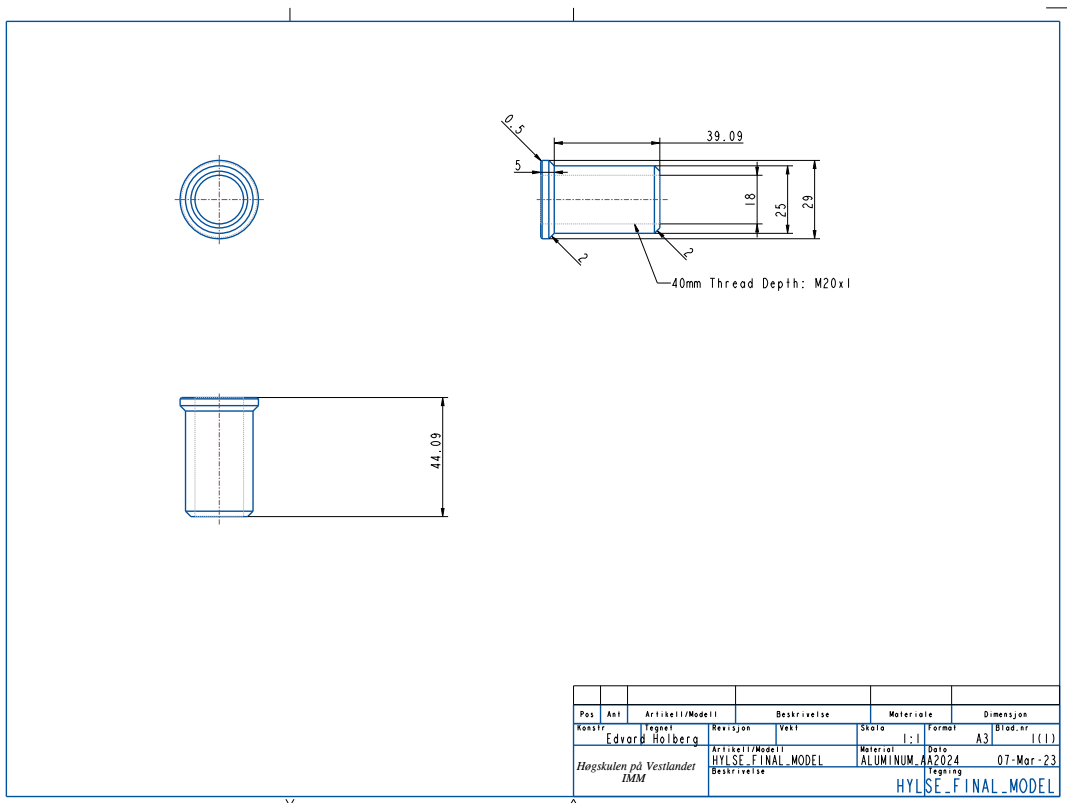
Figur 25: Første sveising. (Sammenstilling)



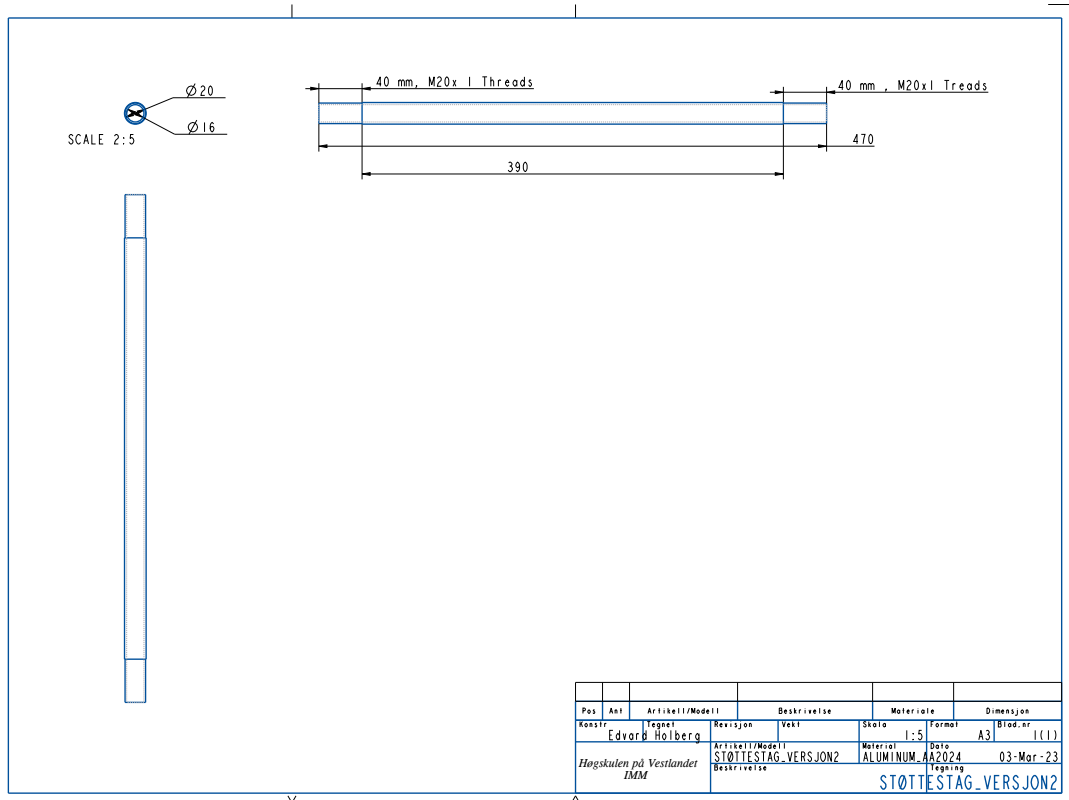
Figur 26: Aluminiumrør. (Komponent)



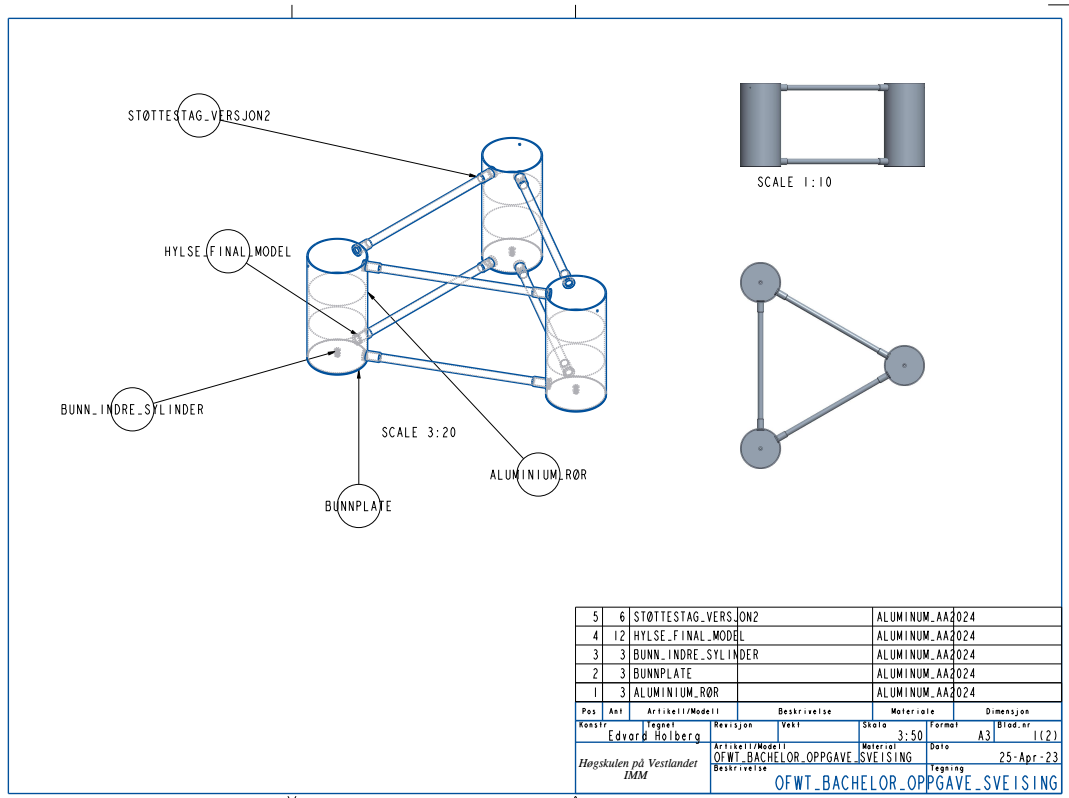
Figur 27: Andre sveising. (Sammenstilling)



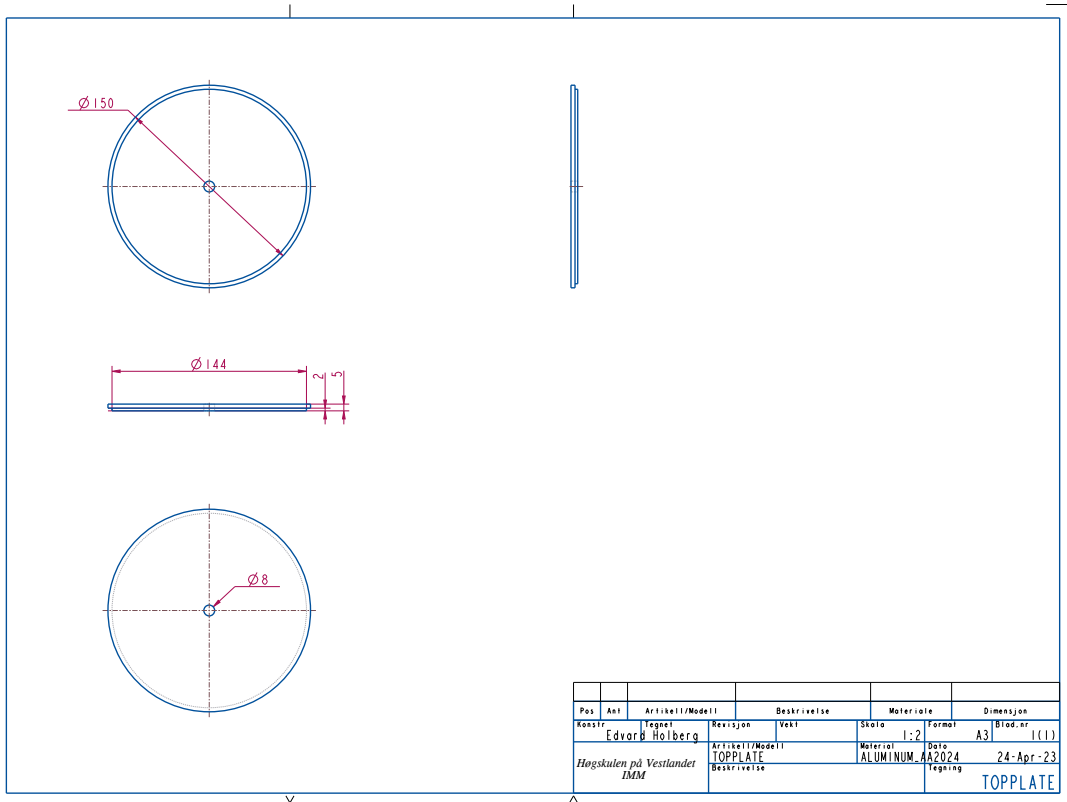
Figur 28: Hylse til støttestag. (Komponent)



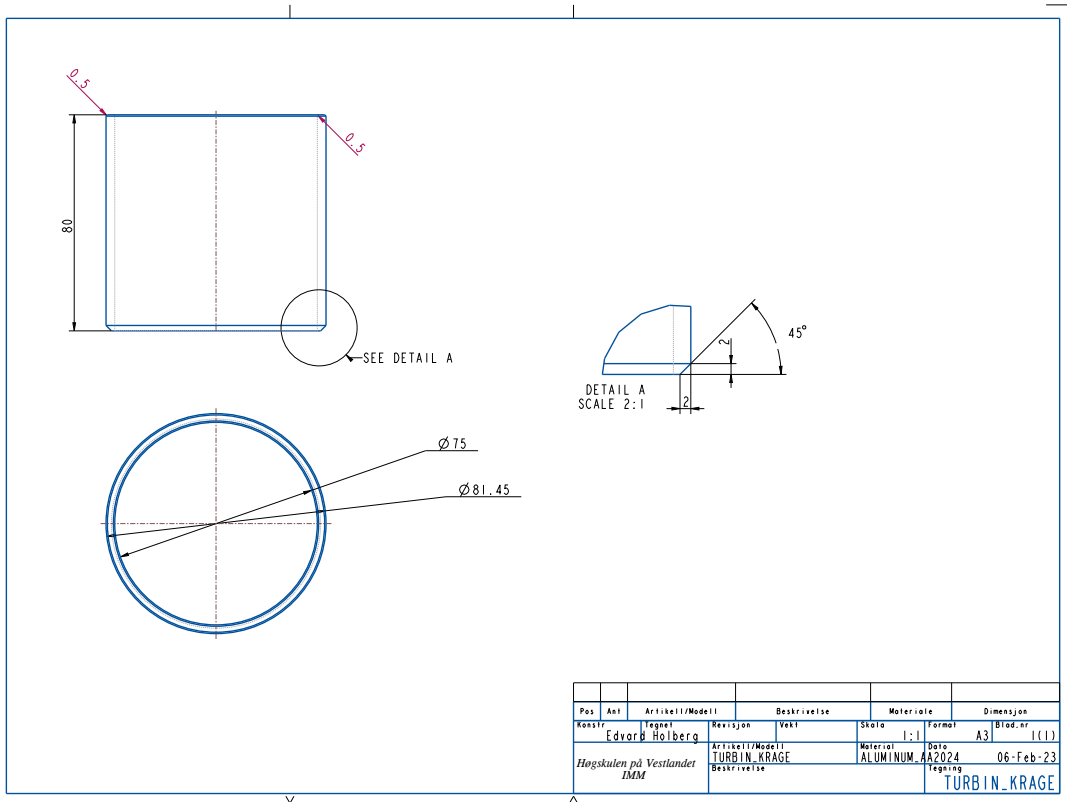
Figur 29: Støttestag. (Komponent)



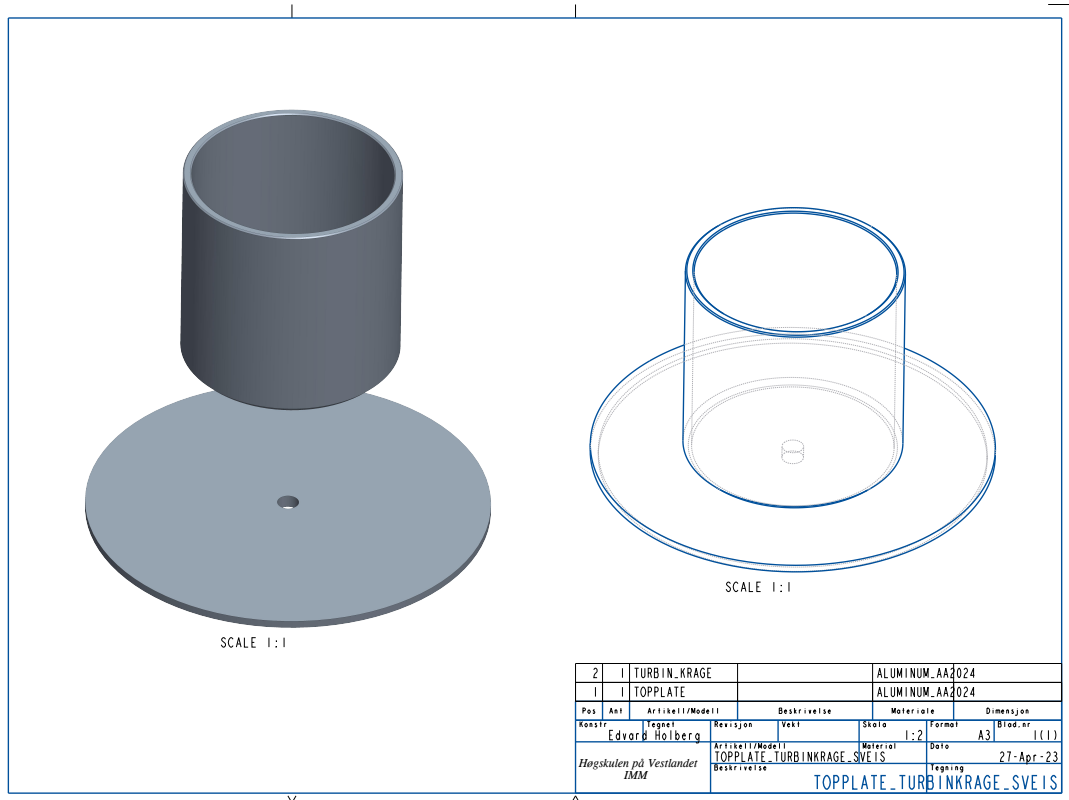
Figur 30: Tredje sveising (Sammenstilling)



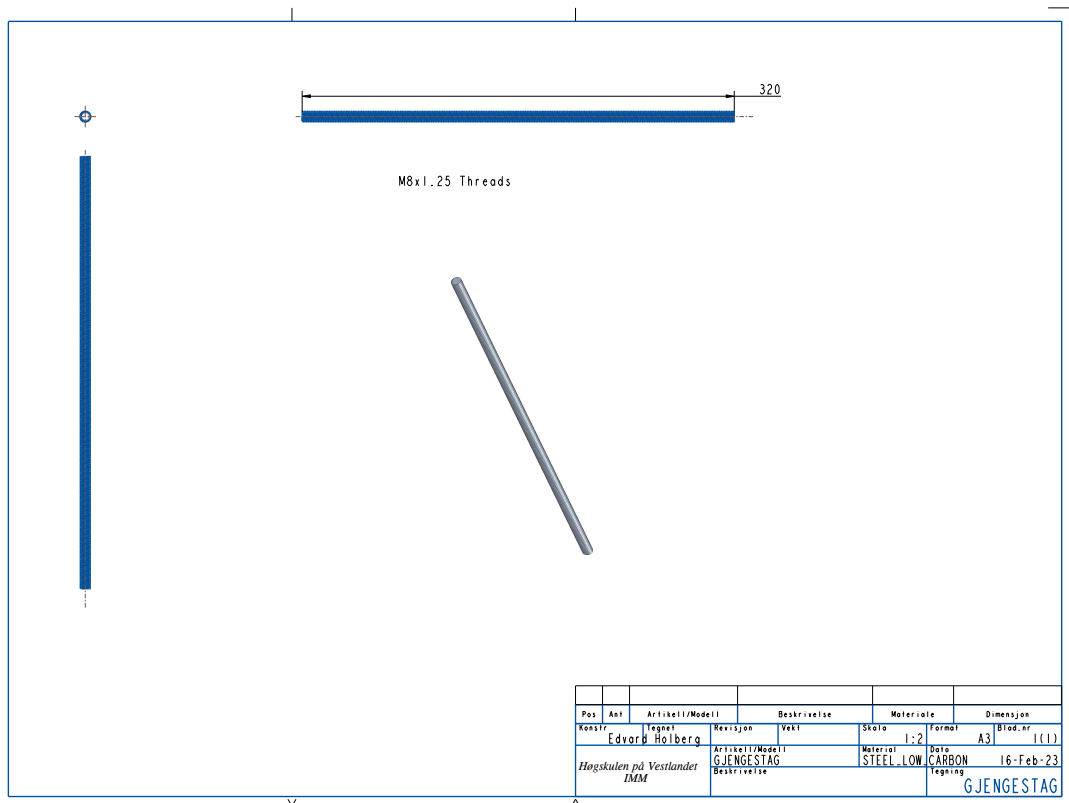
Figur 31: Topplate. (Komponent)



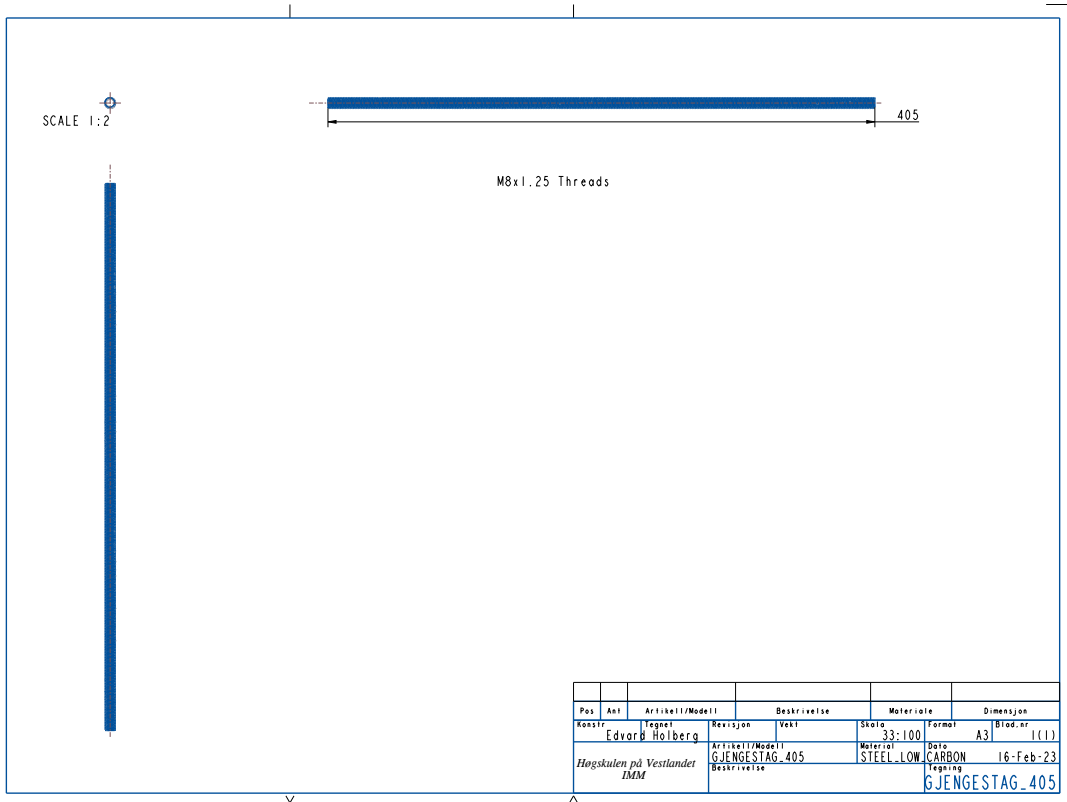
Figur 32: Turbinkrage. (Komponent)



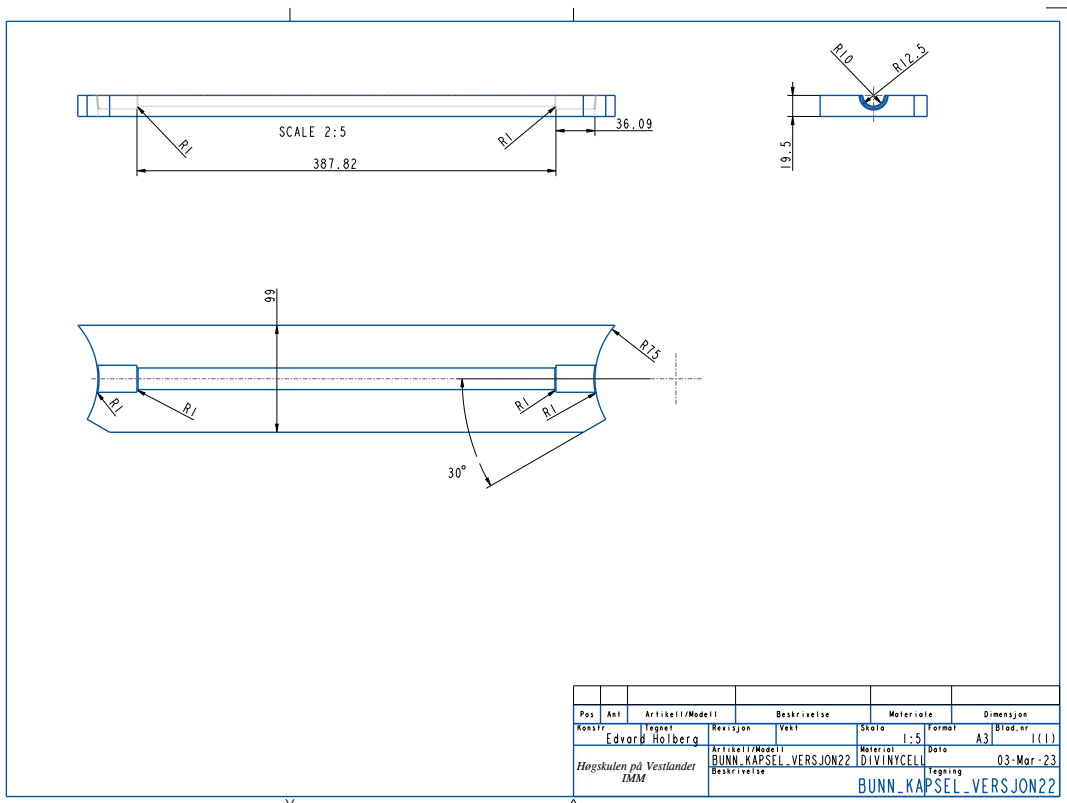
Figur 33: Fjerde sveising. (Sammenstilling)



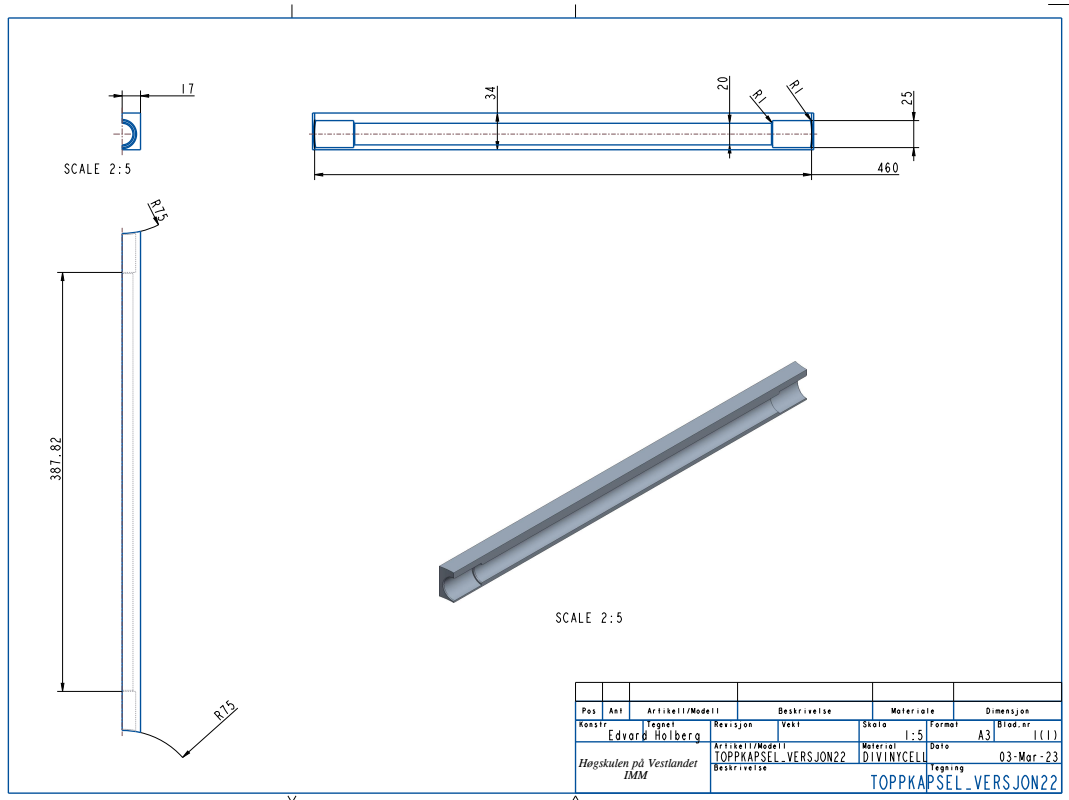
Figur 34: Gjengestag. (Komponent)



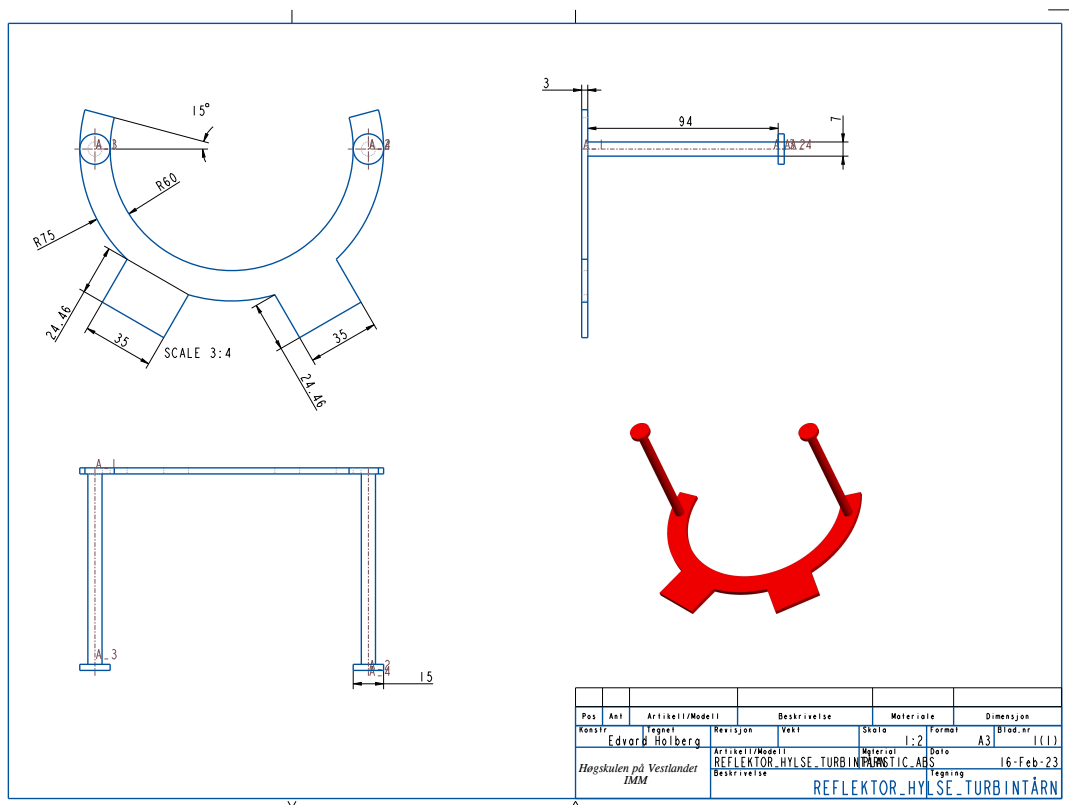
Figur 35: Gjengestag. (Komponent)



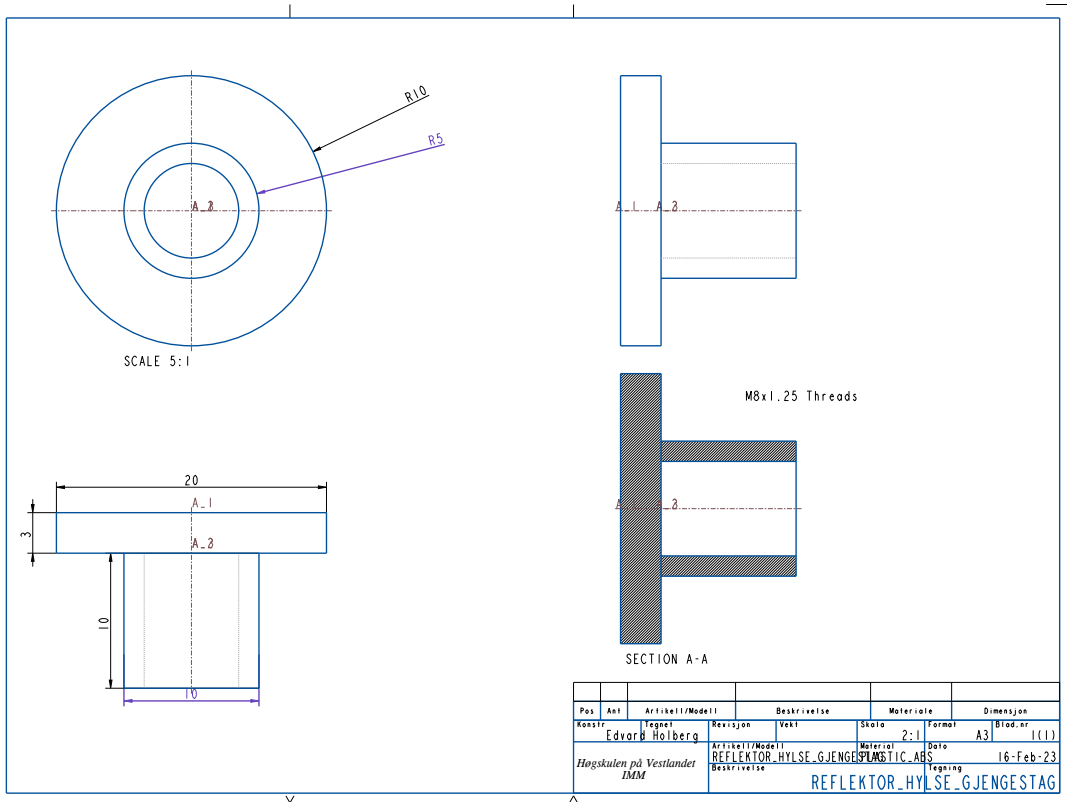
Figur 36: To av disse utgjør en av tre pontonger i siste sammenstilling. (Komponent)



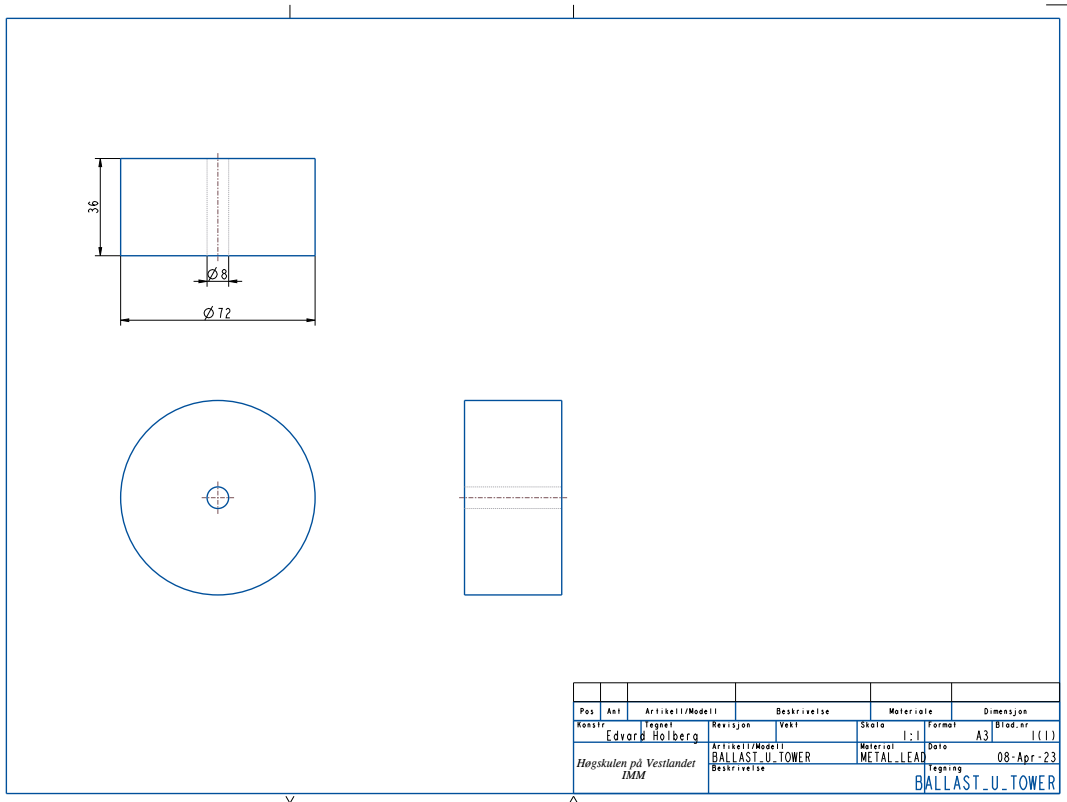
Figur 37: To av disse utgjør en av tre koblingsbroer i siste sammenstilling. (Komponent)



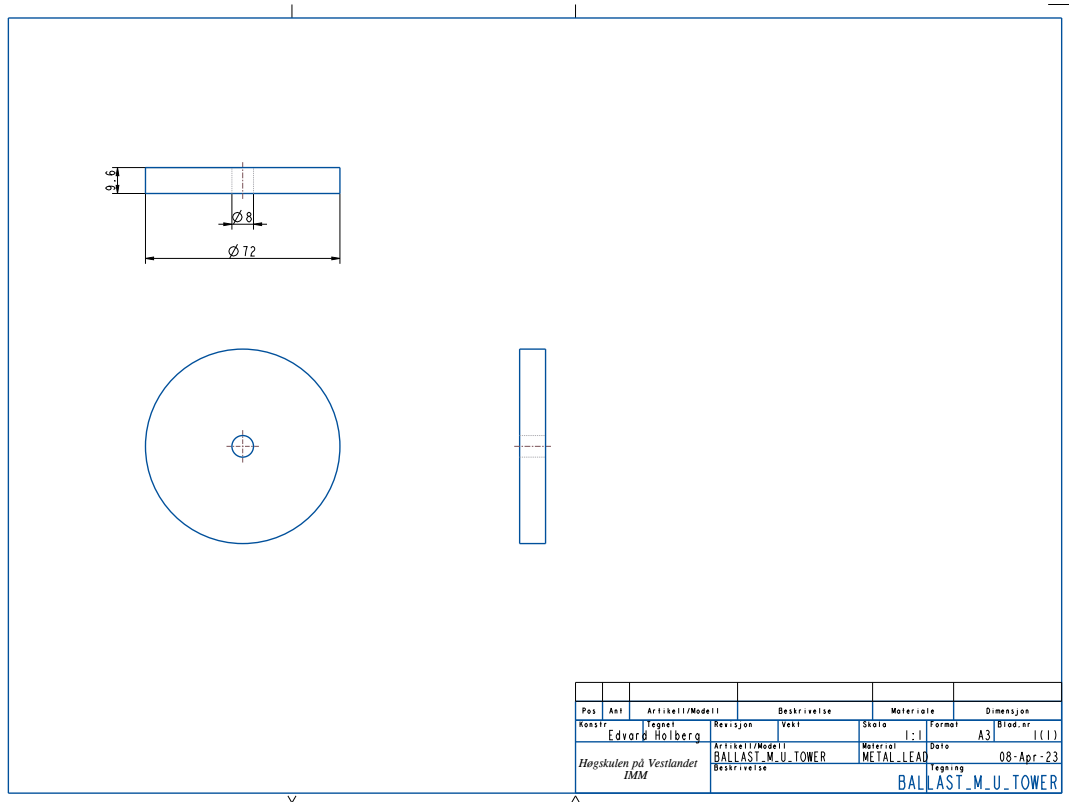
Figur 38: Festepunkt til reflektorer for Qualisys kamerasystem. (Komponent)



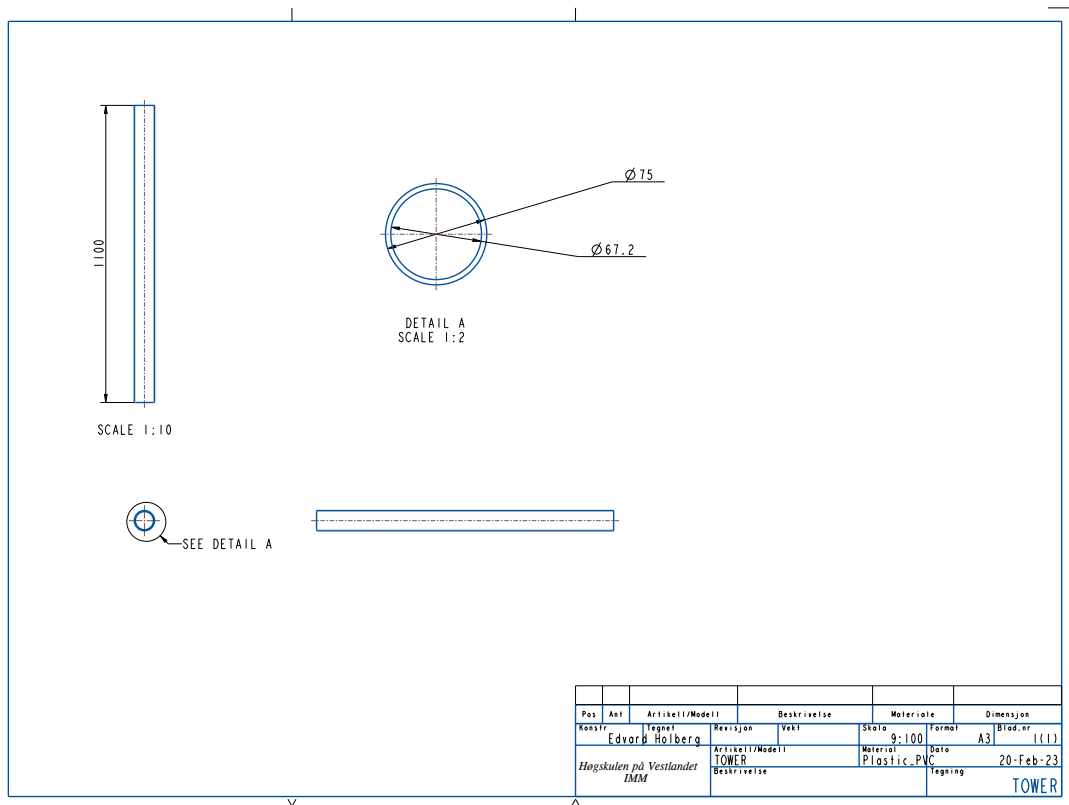
Figur 39: Festepunkt til reflektorer for Qualisys kamerasystem. (Komponent)



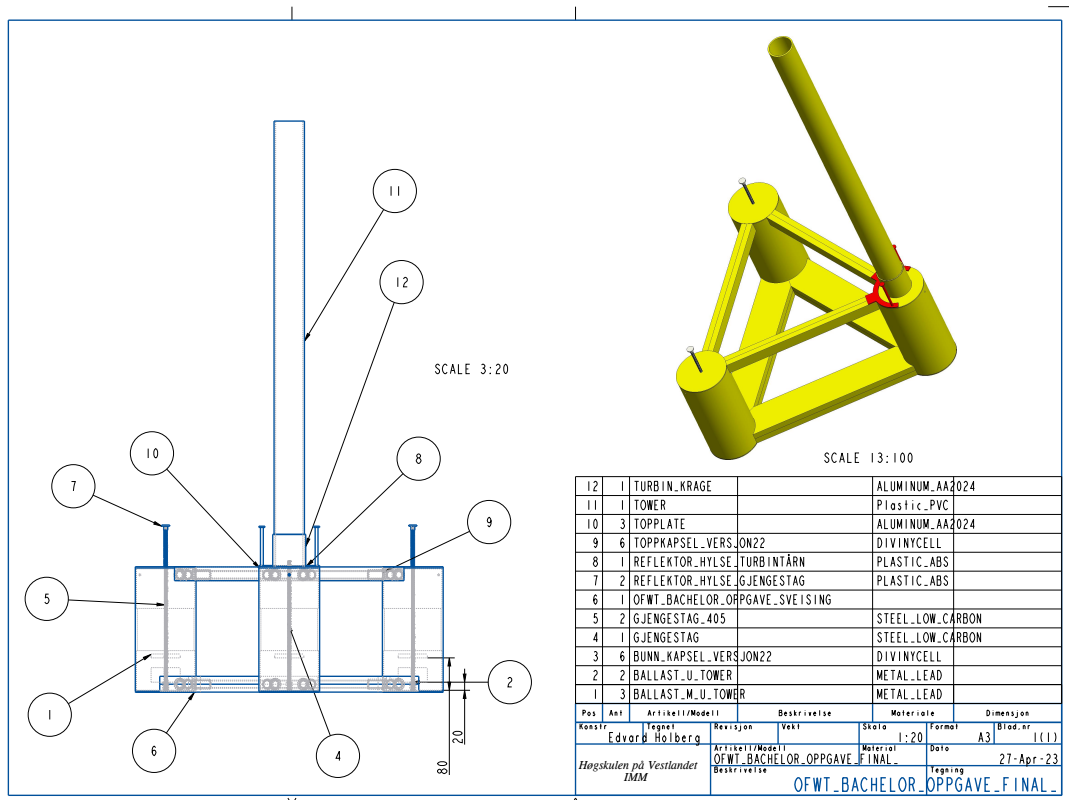
Figur 40: Ballast som representerer motvekt for turbintårnet. (Ballast)



Figur 41: Ballast for å få rett dypgang og tyngdepunkt. (Ballast)



Figur 42: Turbintårn. (Komponent)



Figur 43: Sluttprodukt. (Sammenstilling)

Vedlegg B: MATLAB skript

Contents

- INPUT
- CALCULATIONS
- PLOT
- Error to linear fit
- HYSTERESIS, only works if loading off equal points

```
% Load cell calibration
% This script gives you the gain and offset from a load cell calibration
% It also gives you the Error to linear fit and hysteresis
% / GS 01-2023
clear all, close all, clc
format compact, format short g
```

INPUT

```
calibration_date='26/04/2023'; % Enter date of calibration
loadcelltype_and_serialnumber='IFFWMC-1599-250N-IP68, s/n = 016349';% Ex: Ebay, HBM, Sbeam?
project_name='INO WindMoor'; % Enter project name
load_cell_project_name='LC3'; % Load cell numbering/name ex. starboard1, LC0, LC1 ?
Nrate=100; % max capacity in [N] for load cell
applied_load_kg= 1; % set to 0 if applied load already is in [N]
calculate_hysteresis = 1; % Only works if loading and unloading ex: 1 2 3 4 5 4 3 2 1 kg

% Enter APPLIED mass/force in [kg] or [N] first column
% and MEASURED mV/V in second column:
% (Tip: hold Alt button to mark only one column)
applied_measured = [0 -0.0223543
                   2 0.0638674
                   4 0.149952
                   6 0.236111
                   8 0.322149
                  10 0.408103
                   8 0.322266
                   6 0.236192
                   4 0.150156
                   2 0.0640777
                   0 -0.0220597];
```

CALCULATIONS

```
fprintf(1, '==== Load Cell Calibration =====\n')
fprintf(1, 'Date of calibration: %s \n', calibration_date)
fprintf(1, 'Load cell type and serialnumber: %s \n', loadcelltype_and_serialnumber)
fprintf(1, 'Project name: %s \n', project_name)
fprintf(1, 'Load cell project name: %s \n', load_cell_project_name)

ind=find(diff(applied_measured(:,1))<0);
nr_of_points_load_ON = length(applied_measured) - length(ind);
nr_of_points_load_OFF = length(applied_measured) - nr_of_points_load_ON;

if applied_load_kg == 1
    applied = applied_measured(:,1)*9.81;
else
    applied = applied_measured(:,1);
```

Figur 44: MatLab skript for lastcelle kalibrering

```

end
measured = applied_measured(:,2);

% Linear fit
% what should be on x vs y axis? -> Unit Check:
% -> APPLIED = p(1) * MEASURED + p(2)
% -> [N] = [N/ (mV/V)] * [mV/V] + [N] ]
% slope p(1)= dy/dx =[dN/d(mV/V)] -> X = MEASURED [mV/V] on x-axis
% -> Y = APPLIED [N] on y axis.
[p]=polyfit(measured,applied,1);
xfit=min(measured):0.001e-3:max(measured);
gain=p(1);
offset=p(2);
fprintf(1, 'Gain: %0.3f dN/d(mV/V)\n', gain)
fprintf(1, 'Offset: %0.3f N \n', offset)

```

```

===== Load Cell Calibration =====
Date of calibration: 26/04/2023
Load cell type and serialnumber: IFFWMC-1599-250N-IP68, s/n = 016349
Project name: INO WindMoor
Load cell project name: LC3
Gain: 227.933 dN/d(mV/V)
Offset: 5.045 N

```

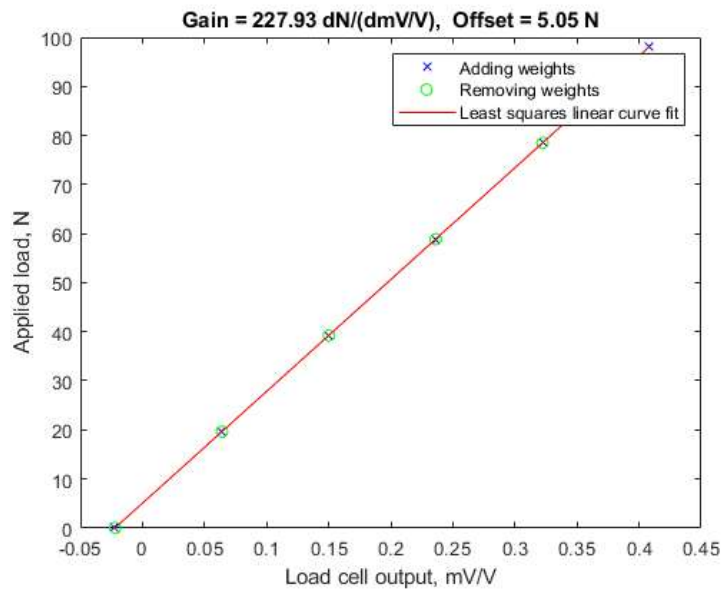
PLOT

```

if nr_of_points_load_OFF >= 2
figure(1)
plot(measured(1:nr_of_points_load_ON),applied(1:nr_of_points_load_ON),'bx',...
      measured(nr_of_points_load_ON+1:end),applied(nr_of_points_load_ON+1:end),'og'), hold on
plot(xfit , p(1).*xfit+p(2),'r-')
xlabel('Load cell output, mV/V')
ylabel('Applied load, N')
legend('Adding weights','Removing weights','Least squares linear curve fit')
title(['Gain = ' num2str(round(gain,2)) ' dN/(dmV/V), Offset = ' num2str(round(offset,2)) ' N'])
else
figure(1)
plot(measured,applied,'bx'), hold on
plot(xfit , p(1).*xfit+p(2),'r-')
xlabel('Load cell output, mV/V')
ylabel('Applied load, N')
legend('Measured points','Least squares linear curve fit')
title(['Gain = ' num2str(round(gain,2)) ' dN/(dmV/V), Offset = ' num2str(round(offset,2)) ' N'])
end

```

Figur 45: MatLab skript for lastcelle kalibrering



Error to linear fit

Error to linear fit:

```

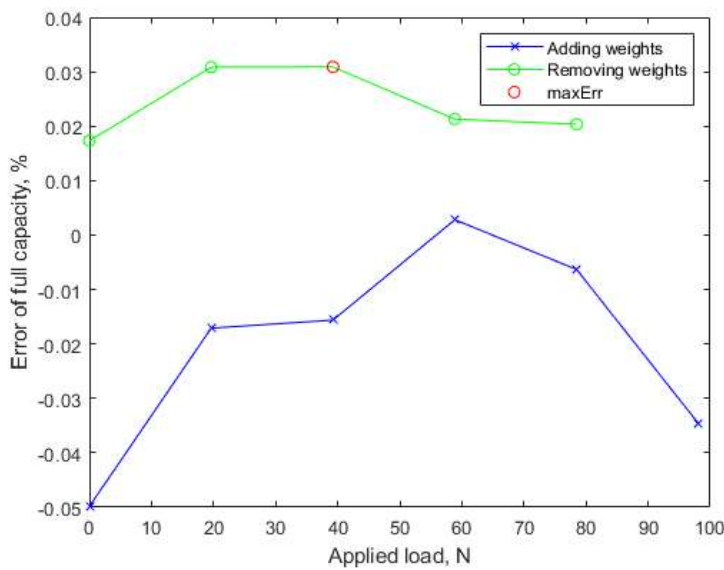
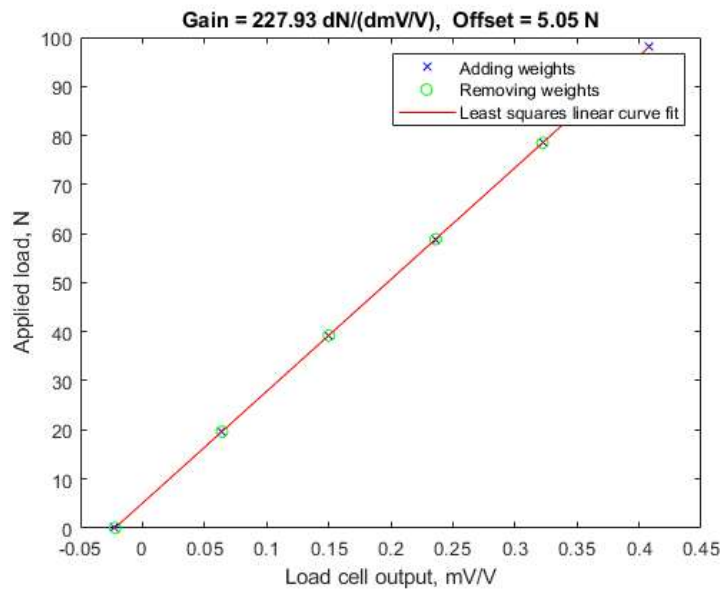
Err=(p(1).*measured+p(2)) - applied;
normErr=Err./Nrate;
[maxErr,ind2]=max(normErr*100);
% ->low error percentage indicates linearity ok

figure(2)
if nr_of_points_load_OFF >= 2
    plot(applied(1:nr_of_points_load_ON),normErr(1:nr_of_points_load_ON)*100,'x-b',...
         applied(nr_of_points_load_ON+1:end),normErr(nr_of_points_load_ON+1:end)*100,'o-g'), hold on
    plot(applied(ind2),normErr(ind2)*100,'ro')
    legend('Adding weights','Removing weights','maxErr')
    xlabel('Applied load, N')
    ylabel('Error of full capacity, %')
else
    plot(applied,normErr*100,'x-b'), hold on
    plot(applied(ind2),normErr(ind2)*100,'ro')
    legend('Normalised error','maxErr')
    xlabel('Applied load, N')
    ylabel('Error of full capacity, %')
end
fprintf(1, 'Maximum Error to linear fit: %0.3f %% \n', maxErr)

```

Maximum Error to linear fit: 0.031 %

Figur 46: MatLab skript for lastcelle kalibrering



HYSTERESIS, only works if loading off equal points

```

if calculate_hysteresis == 1

for i=2:floor(length(applied_measured)/2)
dev_H(i-1)=measured(i)-measured(end-(i-1));
end
H=dev_H./(max(measured)-min(measured))*100;
[maxH ind2]=max(H);

```

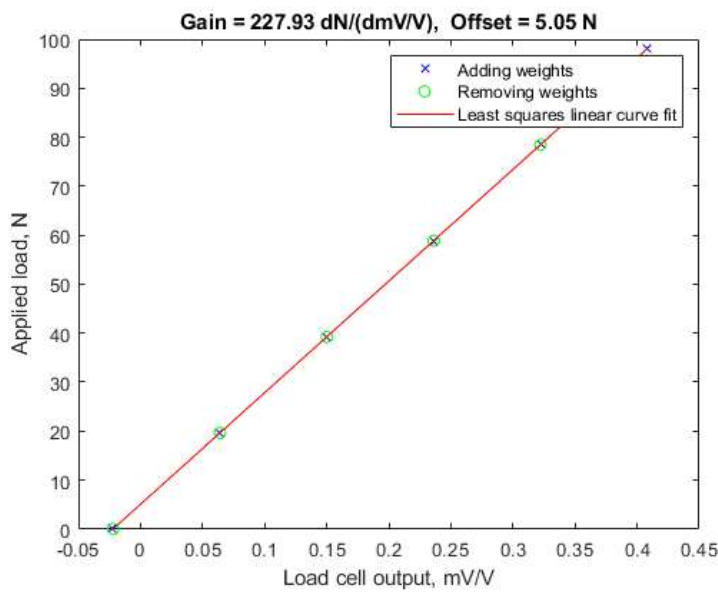
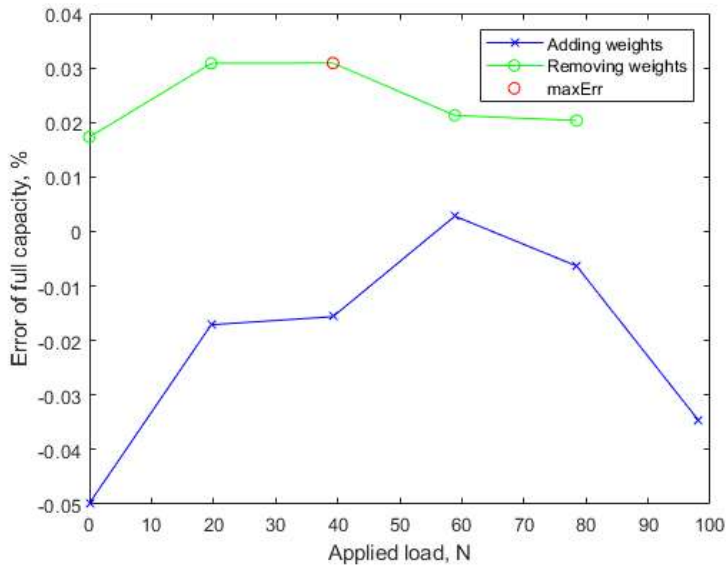
Figur 47: MatLab skript for lastcelle kalibrering

```
fprintf(1, 'Maximum Hysteresis: %0.3f %% \n', maxH)
end

figure(1)
fprintf(1, '=====\n')
```

```
Maximum Hysteresis: -0.019 %
=====
```

Figur 48: MatLab skript for lastcelle kalibrering



Published with MATLAB® R2020a

Figur 49: MatLab skript for lastcelle kalibrering

Contents

- 1. Load file
- 2. Define input
- 3. Look at raw data to be able to set iqs, iqe, fguess
- 4. Plot cut data on top of raw data
- 5. Clean data if necessary and set crstd so that it looks ok
- 6. Zero data around x and reset time to start at t=0.
- 7. Plot new figure with zeroed data and set automatic labels
- 8. Perform least squares curve fit to cut and zeroed motion data
- 9. Print figure automatically as in Lab 1 using num2str for dof and repNr
- 10. Gather data

```
clear all
close all
% Evaluation decay tests
dofmat = [1 2 3 4 5 6 ; "surge" "sway" "heave" "yaw" "pitch" "roll"]
conditionmat = [1 2 ; "free" "moored"];
```

```
dofmat =

2x6 string array

    "1"    "2"    "3"    "4"    "5"    "6"
    "surge" "sway" "heave" "yaw" "pitch" "roll"
```

1. Load file

```
condition = 2; % 1 for free, 2 for moored
RepNr = 1; %repetisjons nummer
dof = 1; %Grad av frihet, 1=surge 2=sway 3=heave 4=yaw 5=pitch 6=roll
qsysfile = ['C:\HVL\Bachelor\Data\2023_INO_WINDMOOR\2023_INO_WINDMOOR_qualisys_proj\Data\decay\decaytestjag_6D.tsv'];
q = readtsv6d_1body(qsysfile)
```

```
q =

struct with fields:

    filename: 'C:\HVL\Bachelor\Data\2023_INO_WINDMOOR\2023_INO_WINDMOOR_qualisys_proj\Data\decay\decaytestjag_6D.tsv'
    frames: 4503
    cameras: 4
    bodies: 1
    freq: 100
    analog: 0
    analogfreq: 0
    description: '→--'
    timeStamp: 'TIME_STAMP→2023-04-25, 10:49:55.451→4148902.83635660'
    datatype: 'DATA_INCLUDED→6D'
    eventsnr: 0
    bodyname: 'WINDMOOR'
    filters: '→No filter'
    translationorigin: '→Global→'
    rotationorigin: 'ROTATION_ORIGIN→Global→'
    bodyheader: {17×1 cell}
    nData: [81054×1 double]
    frames_check: 4503
    data_raw: [4503×18 double]
    freq_raw: 100
    frames_raw: 4503
```

Figur 50: Decaytester

Contents

- 1. INPUT
- 2. READ FILES, put your data in 2022 folder as shown
- 3. CUT AND ZERO DATA
- 4. DOWNSAMPLE wave data from 128Hz to 100 Hz (same as qualisys data)
- 5. CLEAN DATA (Qualisys data can get zero values where markers are not captured)
- 6. RESPONSE ANALYSIS
- 8. PLOT Sxx, Syy, H as function of f:
- 9. PRINT FIGURES to figs folder

```
% Evaluate RAO
clear all
close all

printfigs=0; % Save figures in figs folder, set to 0 to not overwrite!
```

1. INPUT

```
runNr = 1;
repNr = 1;
dof = 2; % choose dof X=1, Y=2, Z=3, yaw=4, pitch=5, roll=6
gaugeNr = 3; % choose gauge nr to evaluate
Hs = 0.062;
eigfreqsfromdecay = [0.131 0.124 0.616 0.415 0.405 0.415]; % [Hz] fd from decay tests må oppdateres
Tp = 0.9
test = 11 %Første tall 1=Jonswap, 2 = Whitenoise, 3 = ekstra

gamma = 3.3;
checkcut = 1; % disable to 0 after having cut
qstart_time = 60; % [s] Start time for qualisys cut
wstart_time = 60; % [s] Start time for wave cut
end_time = 60*22; % [s] End time, enter whichever is shorter - 1198s for C1 Run1 sample file works
downsample = 1; % 1=Yes, downsample wavedata to 100Hz if qualisys is at 100Hz
cleandata = 0; % 1=Yes, if qualisys data has a lot of holes
CrtSTD = 8; % Clean data sensitivity
windowNr = 8; % pwelch window Number, more windows - less details (smoother)
filter = 1; % 0=1, Butterwoth, bandpass filter
cutoff_highpass = 0.01; % removing below this frequency, look at Sxx&Syy to decide
cutoff_lowpass = 10; % removing above this frequency, look at Sxx&Syy to decide

>windowNr = [2 10 30];
for i=1:3
```

```
gaugeNr=1;
>RunNr=1;
>windowNr=windowNr(i);
```

2. READ FILES, put your data in 2022 folder as shown

```
%sysfile6D=['../qualisysdata/C1_Run' num2str(runNr) '_rep' num2str(repNr) '_6D.tsv'];
%sysfile6D=['../qualisysdata/2022/ME2_Run' num2str(runNr) '_rep' num2str(repNr) '_6D.tsv'];
%sysfile6D=['C:\HVL\Bacheloer\Data\2023_INO_WINDMOOR\2023_INO_WINDMOOR_qualisys_proj\Data\whitenoise\Whitenoise1800006_6D.tsv'];
if test == 11
    qsysfile6D = ['C:\HVL\Bacheloer\Data\2023_INO_WINDMOOR\2023_INO_WINDMOOR_qualisys_proj\Data\Jonswap\JonSwapMedLastCelle0001_6D.tsv'];
elseif test == 12
    qsysfile6D = ['C:\HVL\Bacheloer\Data\2023_INO_WINDMOOR\2023_INO_WINDMOOR_qualisys_proj\Data\Jonswap\JonSwapMedLastCelle0002_6D.tsv'];
elseif test == 13
    qsysfile6D = ['C:\HVL\Bacheloer\Data\2023_INO_WINDMOOR\2023_INO_WINDMOOR_qualisys_proj\Data\Jonswap\JonSwapMedLastCelle0003_6D.tsv'];
elseif test == 11801
    qsysfile6D = ['C:\HVL\Bacheloer\Data\2023_INO_WINDMOOR\2023_INO_WINDMOOR_qualisys_proj\Data\Jonswap\JonSwap1800004_6D.tsv'];
elseif test == 11802
    qsysfile6D = ['C:\HVL\Bacheloer\Data\2023_INO_WINDMOOR\2023_INO_WINDMOOR_qualisys_proj\Data\Jonswap\JonSwap1800005_6D.tsv'];
elseif test == 11803
    qsysfile6D = ['C:\HVL\Bacheloer\Data\2023_INO_WINDMOOR\2023_INO_WINDMOOR_qualisys_proj\Data\Jonswap\JonSwap1800006_6D.tsv'];
elseif test == 21
    qsysfile6D = ['C:\HVL\Bacheloer\Data\2023_INO_WINDMOOR\2023_INO_WINDMOOR_qualisys_proj\Data\whitenoise\WhiteNoise1800001_6D.tsv'];
elseif test == 22
    qsysfile6D = ['C:\HVL\Bacheloer\Data\2023_INO_WINDMOOR\2023_INO_WINDMOOR_qualisys_proj\Data\whitenoise\WhiteNoise1800002_6D.tsv'];
elseif test == 23
    qsysfile6D = ['C:\HVL\Bacheloer\Data\2023_INO_WINDMOOR\2023_INO_WINDMOOR_qualisys_proj\Data\whitenoise\WhiteNoise1800003_6D.tsv'];
elseif test == 21801
    qsysfile6D = ['C:\HVL\Bacheloer\Data\2023_INO_WINDMOOR\2023_INO_WINDMOOR_qualisys_proj\Data\whitenoise\WhiteNoise1800004_6D.tsv'];
elseif test == 21802
    qsysfile6D = ['C:\HVL\Bacheloer\Data\2023_INO_WINDMOOR\2023_INO_WINDMOOR_qualisys_proj\Data\whitenoise\WhiteNoise1800005_6D.tsv'];
elseif test == 21803
    qsysfile6D = ['C:\HVL\Bacheloer\Data\2023_INO_WINDMOOR\2023_INO_WINDMOOR_qualisys_proj\Data\whitenoise\WhiteNoise1800006_6D.tsv'];
elseif test == 3
    qsysfile6D = [''];
end
```

Figur 51: RAO


```

q=readsv6d_lbody(qsysfile6D)

%g=dir(['../wavedata/c1_Run' num2str(runNr) '_rep' num2str(repNr) '.txt']);
%g=dir(['C:\HVL\Bachelor\Data\2203_Bachelor_V23_IMM_M_32\Hs0.062_Tp0.9\Bachelor.experiment - Jonswap_Hs0.062_Tp0.9_20230425T114251.txt']);
%den over funker, men ikke den under, Hva er forskjellen????????????????
%g=dir(['C:\HVL\Bachelor\Data\2203_Bachelor_V23_IMM_M_32\Bachelor.experiment - Whitenoise_Hs0.04_Freq0.2-2_2_20230428T123211.txt']);
if test == 11
    g=dir(['C:\HVL\Bachelor\Data\2203_Bachelor_V23_IMM_M_32\Hs0.062_Tp0.9\Bachelor.experiment - Jonswap_Hs0.062_Tp0.9_20230426T144904.txt']);
elseif test == 12
    g=dir(['C:\HVL\Bachelor\Data\2203_Bachelor_V23_IMM_M_32\Hs0.062_Tp1.9\Bachelor.experiment_20230426T154206.txt']);
elseif test == 13
    g=dir(['C:\HVL\Bachelor\Data\2203_Bachelor_V23_IMM_M_32\Hs15\Bachelor.experiment_20230426T163508.txt']);
elseif test == 11801
    g=dir(['C:\HVL\Bachelor\Data\2203_Bachelor_V23_IMM_M_32\Hs0.062_Tp0.9\Bachelor.experiment - Jonswap_Hs0.062_Tp0.9_20230428T142220.txt']);
elseif test == 11802
    g=dir(['C:\HVL\Bachelor\Data\2203_Bachelor_V23_IMM_M_32\Hs0.062_Tp1.9\Bachelor.experiment_20230428T151522.txt']);
elseif test == 11803
    g=dir(['C:\HVL\Bachelor\Data\2203_Bachelor_V23_IMM_M_32\Hs15\Bachelor.experiment - Jonswap_Hs0.15_Tp1.4_20230428T161139.txt']);
elseif test == 21
    g=dir(['C:\HVL\Bachelor\Data\2203_Bachelor_V23_IMM_M_32\Bachelor.experiment_20230425T115135.txt']);
elseif test == 22
    g=dir(['C:\HVL\Bachelor\Data\2203_Bachelor_V23_IMM_M_32\Bachelor.experiment_20230425T170552.txt']);
elseif test == 23
    g=dir(['C:\HVL\Bachelor\Data\2203_Bachelor_V23_IMM_M_32\Bachelor.experiment_20230425T185854.txt']);
elseif test == 21801
    g=dir(['C:\HVL\Bachelor\Data\2203_Bachelor_V23_IMM_M_32\Bachelor.experiment_20230428T085736.txt']);
elseif test == 21802
    g=dir(['C:\HVL\Bachelor\Data\2203_Bachelor_V23_IMM_M_32\Bachelor.experiment_20230428T104037.txt']);
elseif test == 21803
    g=dir(['C:\HVL\Bachelor\Data\2203_Bachelor_V23_IMM_M_32\Bachelor.experiment - Whitenoise_Hs0.04_Freq0.2-2_2_20230428T123211.txt']);
elseif test == 3
    g=dir(['']);
end
wavefile = [g.folder '/' g.name];
w=readgauges(wavefile);
w.data=w.data(:,gaugeNr);
%C:\HVL\Bachelor\Data\2203_Bachelor_V23_IMM_M_32\Gain_corection_1\Bachelor.experiment - Jonswap_Hs0.15_Tp1.4_20230428T161139.txt"

```

```

q =
struct with fields:
    filenames: 'C:\HVL\Bachelor\Data\2023_INO_WINDMOOR\2023_INO_WINDMOOR_qualisys_proj\Data\Jonswap\JonSwapMedLastCelle0001_6D.tsv'
    frames: 138000
    cameras: 4
    bodies: 1
    freq: 100
    analog: 0
    analogfreq: 0
    description: '---'
    timeStamp: 'TIME_STAMP=2023-04-26, 14:49:28.060-4249673.45370070'
    datatype: 'DATA_INCLUDED=60'
    eventsnr: 0
    bodyname: 'WINDMOOR'
    filters: '-No filter'
    translationorigin: '-Global+'
    rotationorigin: 'ROTATION_ORIGIN=Global+'
    bodyheader: {17x1 cell}
    nData: [2484000x1 double]
    frames_check: 138000
    data_raw: [138000x18 double]
    freq_raw: 100
    frames_raw: 138000
    Time: [138000x1 double]
    data60: [138000x6 double]
    residual: [138000x1 double]
    rotmatrices: [3x3x138000 double]

```

```

q =
struct with fields:
    filename: 'C:\HVL\Bachelor\Data\2023_INO_WINDMOOR\2023_INO_WINDMOOR_qualisys_proj\Data\Jonswap\JonSwapMedLastCelle0001_6D.tsv'
    frames: 138000
    cameras: 4
    bodies: 1
    freq: 100
    analog: 0
    analogfreq: 0
    description: '---'
    timeStamp: 'TIME_STAMP=2023-04-26, 14:49:28.060-4249673.45370070'
    datatype: 'DATA_INCLUDED=60'
    eventsnr: 0
    bodyname: 'WINDMOOR'
    filters: '-No filter'

```

Figur 52: RAO

```

translationorigin: '-Global+'
rotationorigin: 'ROTATION_ORIGIN+Global+'
bodyheader: {17x1 cell}
nData: [2484000x1 double]
frames_checks: 138000
data_raw: [138000x18 double]
freq_raw: 100
frames_raw: 138000
time: [138000x1 double]
data6D: [138000x6 double]
residual: [138000x1 double]
rotmatrices: [3x3x138000 double]

q =

struct with fields:

    filename: 'C:\HVLL\Bachelor\Data\2023_INO_WINDMOOR\2023_INO_WINDMOOR_qualisys_proj\Data\Jonswap\JonSwapMedLastCelle0001_6D.tsv'
    frames: 138000
    cameras: 4
    bodies: 1
    freq: 100
    analog: 0
    analogfreq: 0
    description: '---'
    timestamps: 'TIME_STAMP=2023-04-26, 14:49:28.060+4249673.45370070'
    datatype: 'DATA_INCLUDED=6D'
    eventsnr: 0
    bodyname: 'WINDMOOR'
    filters: '-No filter'
    translationorigin: '-Global+'
    rotationorigin: 'ROTATION_ORIGIN+Global+'
    bodyheader: {17x1 cell}
    nData: [2484000x1 double]
    frames_check: 138000
    data_raw: [138000x18 double]
    freq_raw: 100
    frames_raw: 138000
    time: [138000x1 double]
    data6D: [138000x6 double]
    residual: [138000x1 double]
    rotmatrices: [3x3x138000 double]

```

3. CUT AND ZERO DATA

look at it first:

```

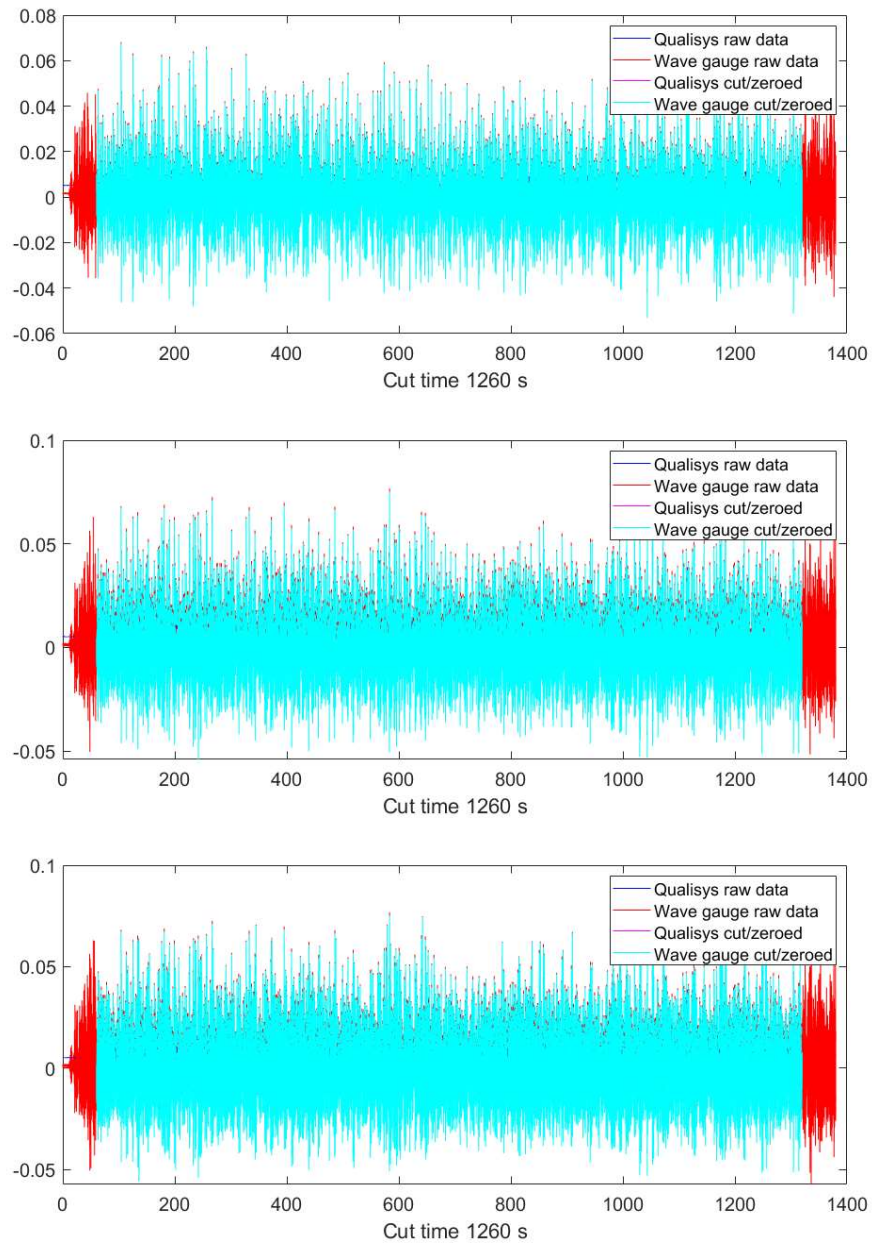
if checkcut==1
    hf1A=figure(1);
    plot(q.time,q.data6D(:,dof),'b',w.time,w.data,'r'), hold on
    set(hf1A,'units','normalized','position',[0.2 0.3 0.7 0.5])
    set(gca,'fontsize',15)
end

[q,w]=cut_and_zero(qstart_time,wstart_time,end_time,q,w);

if checkcut==1
    hf1B=figure(1);
    plot(q.time+qstart_time,q.data6D(:,dof),'m',w.time+wstart_time,w.data,'c')
    xlabel(['Cut time ' num2str(q.time(end)) ' s'])
    set(hf1B,'units','normalized','position',[0.2 0.3 0.7 0.5])
    legend('Qualisys raw data', 'Wave gauge raw data','Qualisys cut/zeroed', 'Wave gauge cut/zeroed')
    set(gca,'fontsize',15)
end

```

Figur 53: RAO



4. DOWNSAMPLE wave data from 128Hz to 100 Hz (same as qualisys data)

```

if downsample==1
    w.data=interp1(w.time,w.data,q.time);
    w.frames=q.frames;

```

Figur 54: RAO

```

w.freq=q.freq;
w.time=q.time;
fprintf(1, 'Wave data down-sampled from %.f to %.f Hz. \n', w.freq_raw,q.freq_raw)
end

```

Wave data down-sampled from 128 to 100 Hz.

Wave data down-sampled from 128 to 100 Hz.

Wave data down-sampled from 128 to 100 Hz.

5. CLEAN DATA (Qualisys data can get zero values where markers are not captured)

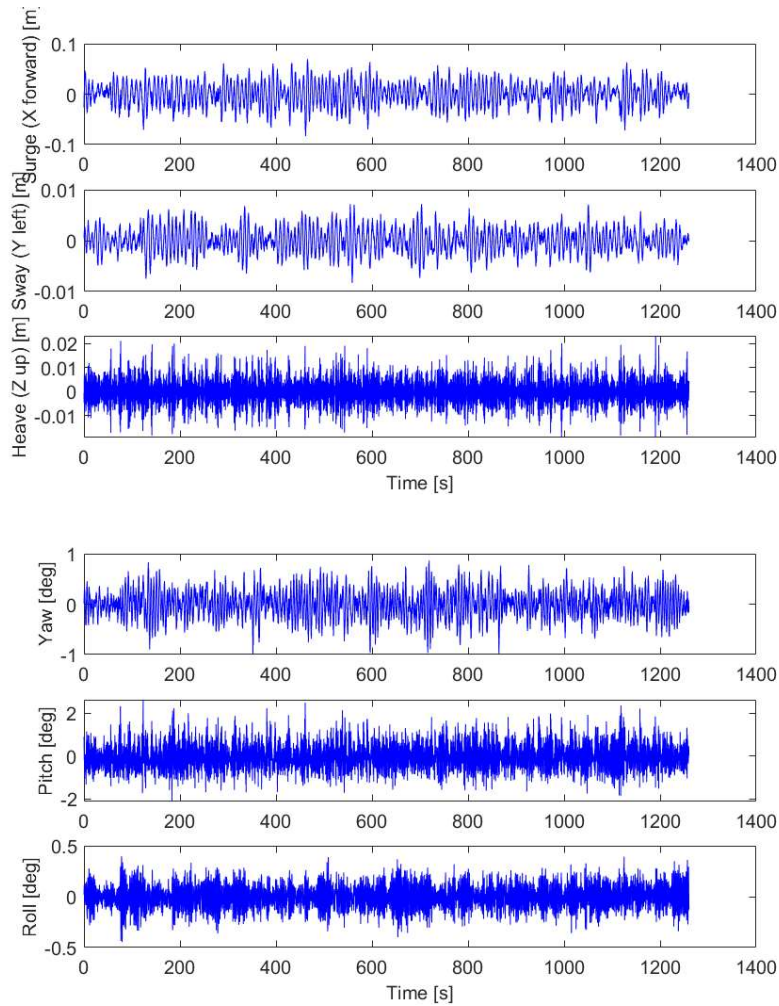
```

if cleandata==1
    fprintf(1, '\nCleaning data...\n')
    plot_qsys % plots figures before cleaned
    %q.data6D(:,dof)=clean_data(q.data6D(:,dof)',CrtSTD,0.001)'; % cleaned data, replaces original
    q.data6D(:,1)=clean_data(q.data6D(:,1)',CrtSTD,0.001)'; % cleaned data, replaces original
    q.data6D(:,2)=clean_data(q.data6D(:,2)',CrtSTD,0.001)'; % cleaned data, replaces original
    q.data6D(:,3)=clean_data(q.data6D(:,3)',CrtSTD,0.001)'; % cleaned data, replaces original
    q.data6D(:,4)=clean_data(q.data6D(:,4)',CrtSTD,0.001)'; % cleaned data, replaces original
    q.data6D(:,5)=clean_data(q.data6D(:,5)',CrtSTD,0.001)'; % cleaned data, replaces original
    q.data6D(:,6)=clean_data(q.data6D(:,6)',CrtSTD,0.001)'; % cleaned data, replaces original
    plot_qsys % plots figures after cleaning, check that ok, maybe you need to set crtstd individually for each dof
    set(gca, 'fontsize', 15)
    % % Save to file when red data looks ok, so that cleandata can be set to 0, to save CPU time.
    % % MAT-file can not save structs, hence renaming to qdata6Dtmp:
    % qdata6Dtmp=q.data6D;
    % save(['cleaned_qdata_runnr' num2str(runNr) '_repnr' num2str(repNr) '.mat'], 'qdata6Dtmp')
    % else
    % if isfile(['cleaned_qdata_runnr' num2str(runNr) '_repnr' num2str(repNr) '.mat'])
    %     load(['cleaned_qdata_runnr' num2str(runNr) '_repnr' num2str(repNr) '.mat'])
    %     q.data6D=qdata6Dtmp;
    % else
    %     fprintf(1, 'Function cleandata has not been run.\n')
    % end
end

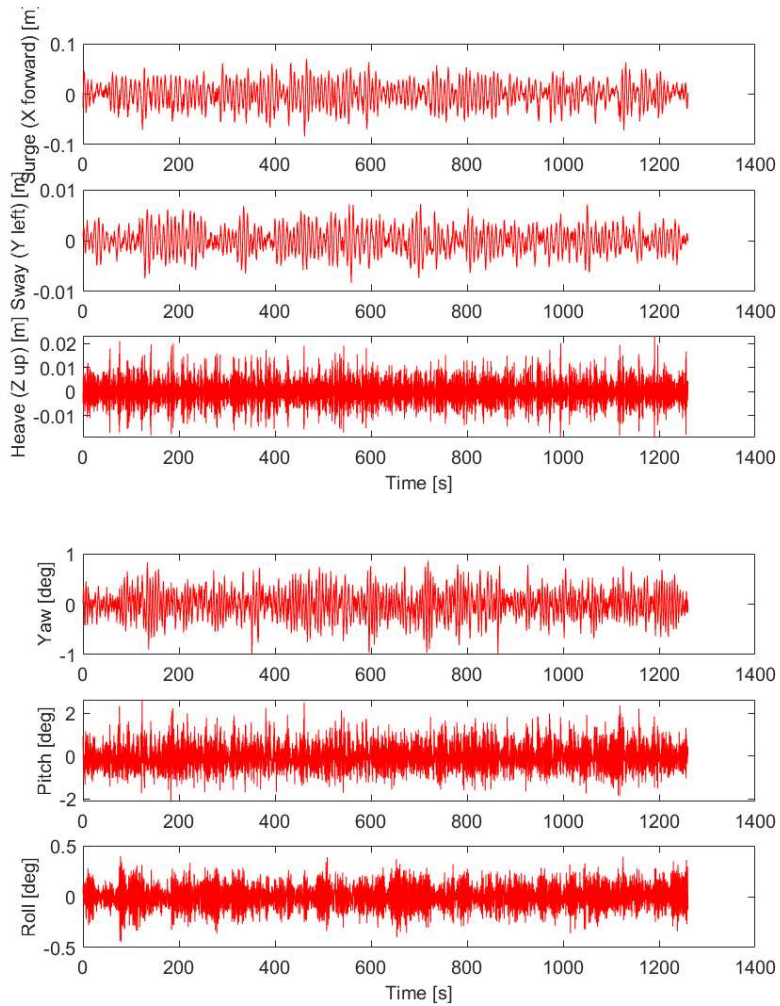
plot_qsys
set(gca, 'fontsize', 15)

```

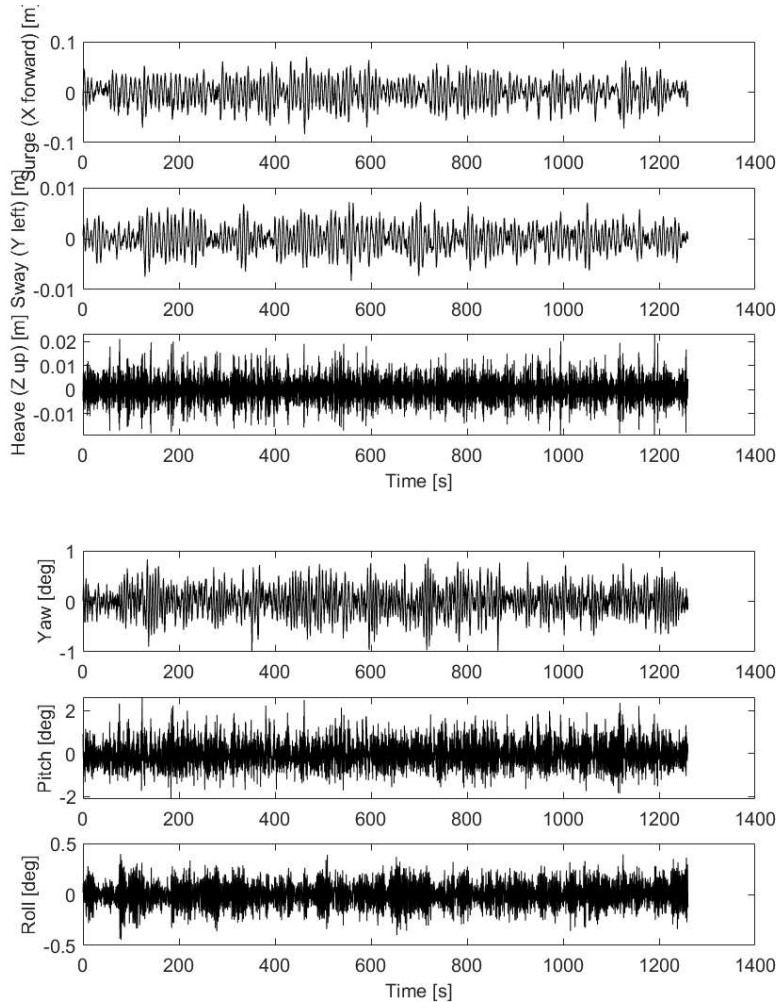
Figur 55: RAO



Figur 56: RAO



Figur 57: RAO



6. RESPONSE ANALYSIS

First some info from `>>help pwelch`: `[Pxx,F] = pwelch(X,WINDOW,NOVERLAP,Fs)` computes the two-sided PSD at the frequencies contained in the vector `F`. `F` must have at least two elements and be expressed in hertz, doc `pwelch` → One sided vs two sided, we want only real values `pwelch` is 2-sided (you see this by plotting negative frequencies) the negative energy must be moved to real positive side, → `2 * Pxx = 2 * pwelch(w.data, window, noverlap, fs)` -Windowing to reduce effect of finite data length (not having continuous data function) -Window and Noverlap must be rounded to nearest integer to avoid warnings Noverlap in percent

```
ind=isfinite(w.data);
ind2=find(ind==0);
% A Get Sxx from wave data using pwelch:
f = 0.005 : 0.005 : w.freq/2; %can not calculate for higher than Nyquist freq
Sxx = pwelch(w.data(1:end-1),round(length(w.data(1:end-1))/windowNr), round(50) , f ,w.freq);

% B Compare to theoretical:
Sxx_theory = jonswap( f,Hs,Tp,gamma,'Hz' );
figure(2)
plot(f,Sxx,f,Sxx_theory,'k-'), hold on
xlim([0 2])
xlabel('f, 1/s')
ylabel('Sxx(f), m^2 s')
set(gcf,'FontSize',15)
%legend('Measured Jonswap','Theoretical Jonswap')
```

Figur 58: RAO

```

legend('Measured Wave')
% C Check RMSE:
rmseSxx(1)= RMSE(Sxx,Sxx_theory)/max(Sxx_theory)*100;
fprintf(1,'Wave spectrum RMSE = %.2f percent \n',rmseSxx(1))

% D Get Syy from motion capture data:
Syy = pwelch(q.data6D(:,dof),round(length(q.data6D(:,dof))/windowNr), round(50) , f ,q.freq);
figure(30)
plot(f,Syy,'b'), hold on
plot([Tp Tp], [0 max(Syy)], 'k--')
plot([eigfreqsfromdecay(1) eigfreqsfromdecay(1)], [0 max(Syy)], 'm--'), hold on
plot([eigfreqsfromdecay(2) eigfreqsfromdecay(2)], [0 max(Syy)], 'r--'), hold on
plot([eigfreqsfromdecay(3) eigfreqsfromdecay(3)], [0 max(Syy)], 'k--'), hold on
plot([eigfreqsfromdecay(4) eigfreqsfromdecay(4)], [0 max(Syy)], 'b--'), hold on
plot([eigfreqsfromdecay(5) eigfreqsfromdecay(5)], [0 max(Syy)], 'g--'), hold on

xlim([0 2])
xlabel('f, 1/s')
ylabel('Pitch-Syy [deg^2 s]')
legend('Pwelch', 'Tp', 'Decay eigfreqs(jag/sway)', 'Decay eigfreq heave', 'Decay eigfreqs(Swai)', 'Decay eigfreqs(Yaw/Roll)', 'Decay eigfreqs(Pitch)')
set(gca, 'fontSize', 15)
% choose dof X=1, Y=2, Z=3, yaw=4, pitch=5, roll=6

% E FILTER (if necessary):

% F CALCULATE RAO = RESPONSE TRANSFER FUNCTION H:
H_w = sqrt(Syy ./ Sxx);

figure(3)
plot(f,H_w)
xlim([0 2])
xlabel('f, 1/s')
ylabel('abs(H(f), deg/m)')
set(gca, 'fontSize', 15)

```

Wave spectrum RMSE = 3.26 percent

Figur 59: RAO


```
    figure(30)
    print(['../figs/Syy,run',num2str(RunNr),'_dof' num2str(dof) '.png'], '-dpng')
elseif dof==2
    ylabel('Y, Syy, []')
    figure(30)
    print(['../figs/Syy,run',num2str(RunNr),'_dof' num2str(dof) '.png'], '-dpng')
elseif dof==3
    ylabel('Z, Syy, []')
    figure(30)
    print(['../figs/Syy,run',num2str(RunNr),'_dof' num2str(dof) '.png'], '-dpng')
elseif dof==4
    ylabel('Yaw, Syy, []')
    figure(30)
    print(['../figs/Syy,run',num2str(RunNr),'_dof' num2str(dof) '.png'], '-dpng')
elseif dof==5
    ylabel('Pitch, Syy, []')
    figure(30)
    print(['../figs/Syy,run',num2str(RunNr),'_dof' num2str(dof) '.png'], '-dpng')
else dof==6
    ylabel('Roll, Syy, []')
    figure(30)
    print(['../figs/Syy,run',num2str(RunNr),'_dof' num2str(dof) '.png'], '-dpng')
end
end
```

```
end % for loop
```

```
Tp =
```

```
    0.9
```

```
test =
```

```
    11
```

Published with MATLAB® R2020a

Figur 60: RAO

```

% Plot all qualisys data
% reset(0)
% reset(gca)
% reset(gcf)
%colormap = get(gca,'ColorOrder');
colormap = [ 0 0 1 %blue
            1 0 0 % red
            0 0 0 %black
            0 1 0];%green
fig101=figure(101);
fig102=figure(102);
set([fig101 fig102], 'defaultAxesColorOrder', colormap)
set([fig101 fig102], 'units', 'normalized', 'position', [0.4 0.05 0.6 0.6])

fig101=figure(101);
subplot(3,1,1)
plot(q.time,q.data6D(:,1)), hold on
hy1=ylabel('Surge (X forward) [m]');
set(gca, 'fontsize', 15)

subplot(3,1,2)
plot(q.time,q.data6D(:,2)), hold on
hy2=ylabel('Sway (Y left) [m]');
set(gca, 'fontsize', 15)

subplot(3,1,3)
plot(q.time,q.data6D(:,3)), hold on
hy3=ylabel('Heave (Z up) [m]');
hx=xlabel('Time [s]');
set(gca, 'fontsize', 15)

set([hx,hy1,hy2,hy3], 'fontsize', 15)

fig102=figure(102);
subplot(3,1,1)
plot(q.time,q.data6D(:,4)), hold on
hy1=ylabel('Yaw [deg]');
set(gca, 'fontsize', 15)
%ylim([-2 2])

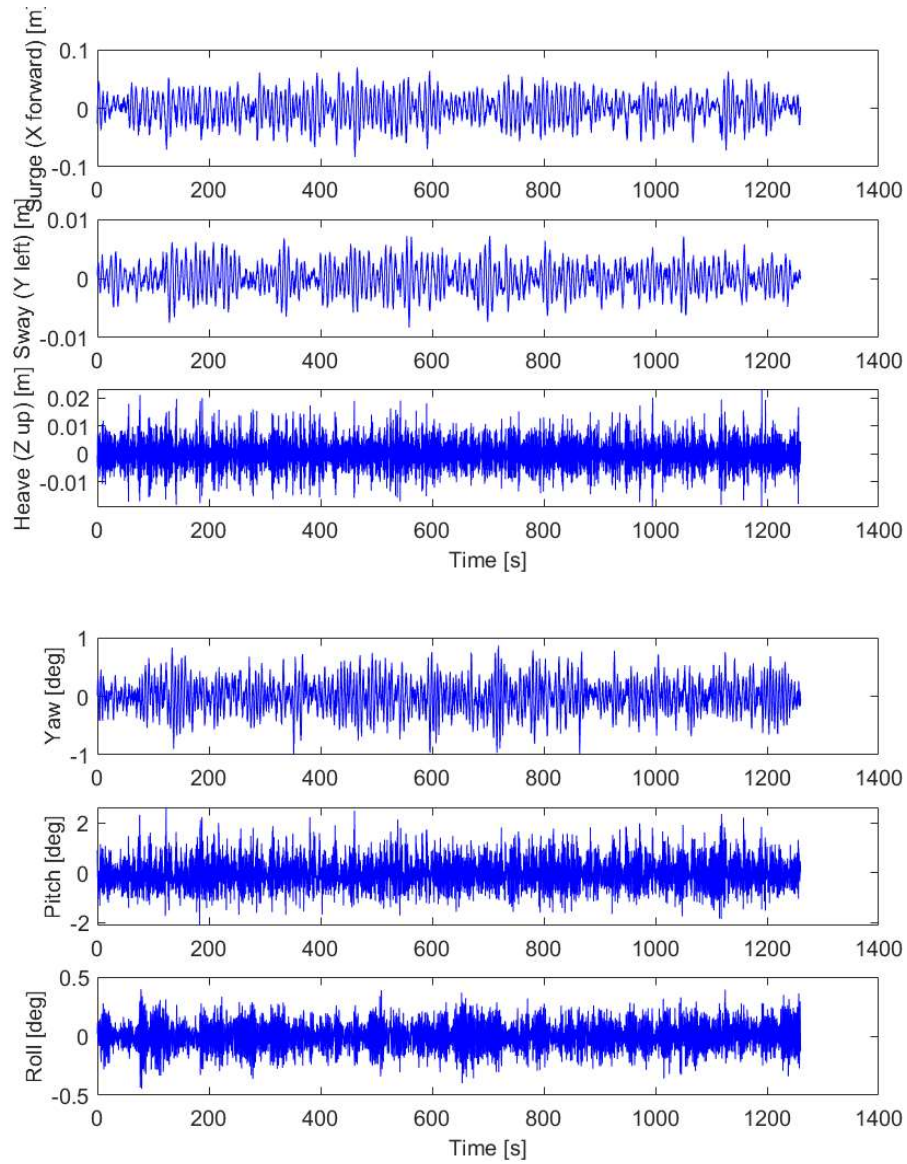
subplot(3,1,2)
plot(q.time,q.data6D(:,5)), hold on
hy2=ylabel('Pitch [deg]');
set(gca, 'fontsize', 15)

subplot(3,1,3)
plot(q.time,q.data6D(:,6)), hold on
hy3=ylabel('Roll [deg]');
hx=xlabel('Time [s]');
set(gca, 'fontsize', 15)

set([hx,hy1,hy2,hy3], 'fontsize', 15)

```

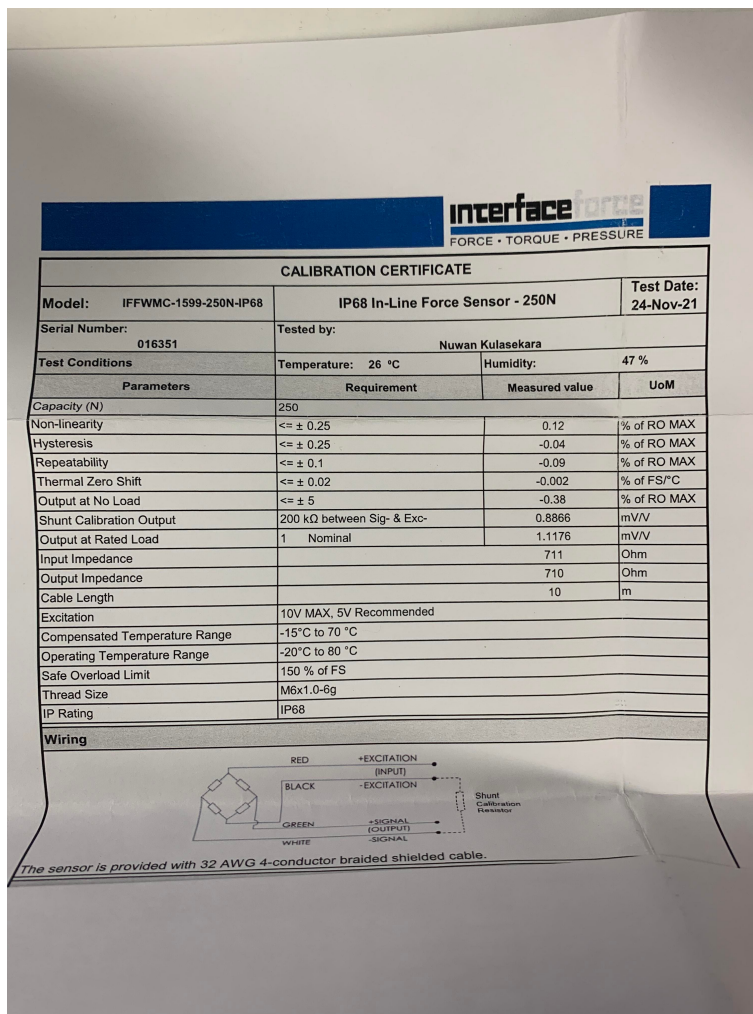
Figur 61: Plot qsys



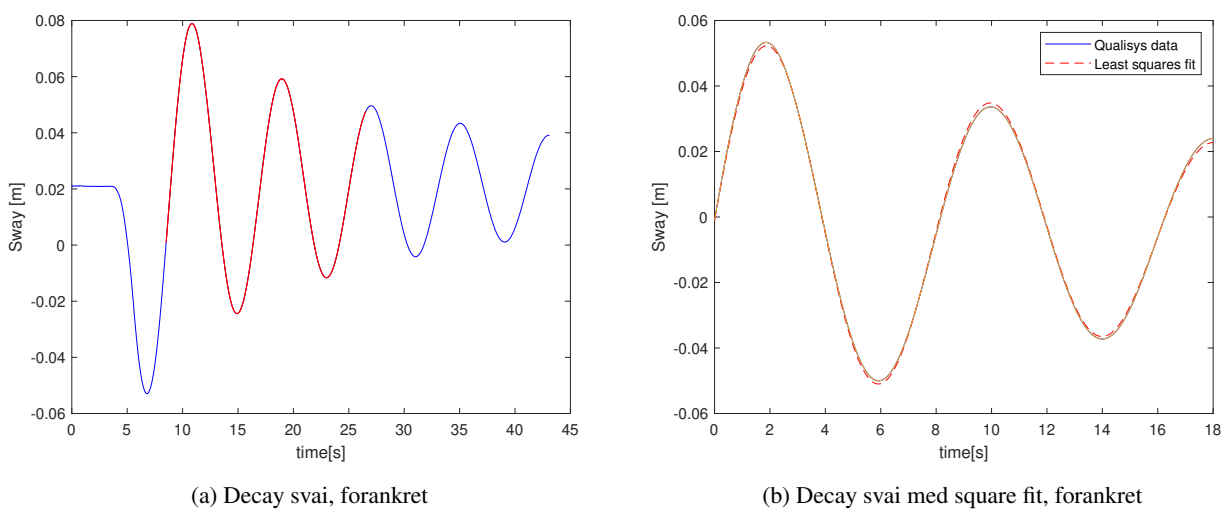
Published with MATLAB® R2020a

Figur 62: Plot qsys

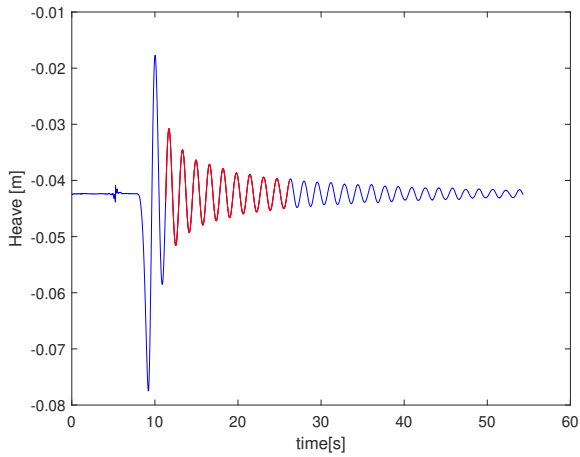
Vedlegg C: Decaytester



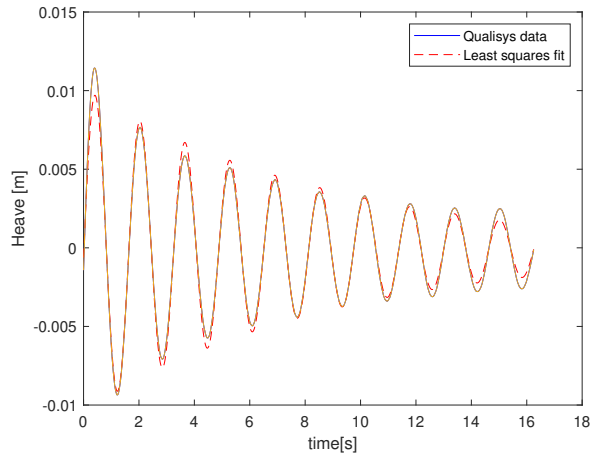
Figur 63: Datablad for en av de 250 N Interface lastcellene brukt på forankringslinene



Figur 64: Decay tester svai

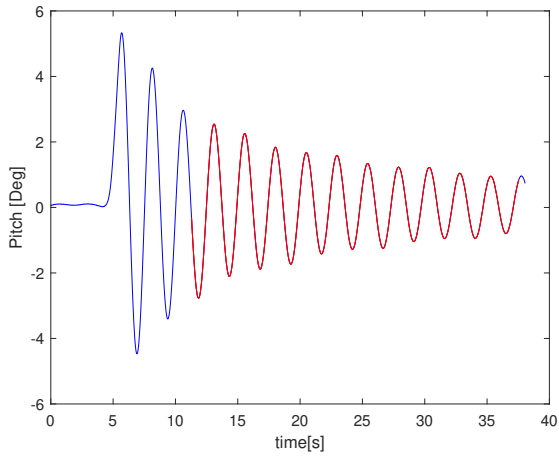


(a) Decay heave, forankret

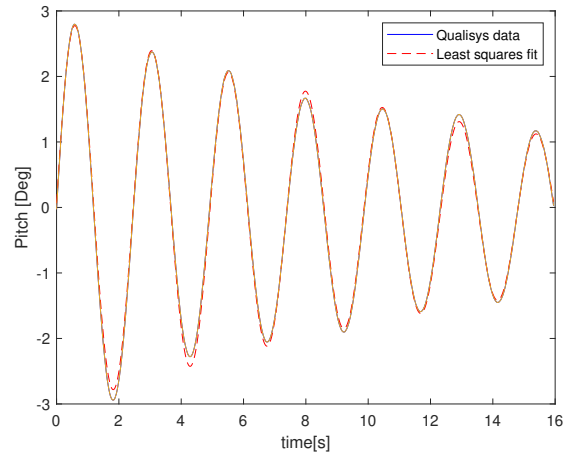


(b) Decay heave med square fit, forankret

Figur 65: Decay tester heave

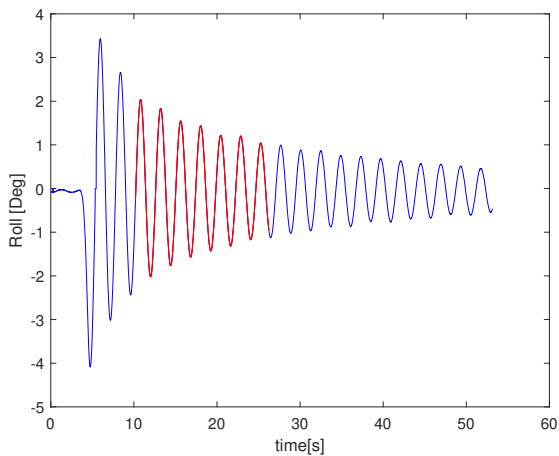


(a) Decay pitch, forankret

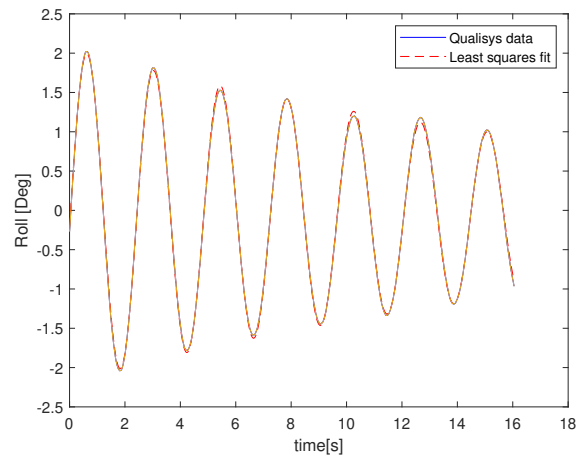


(b) Decay pitch med square fit, forankret

Figur 66: Decay tester pitch

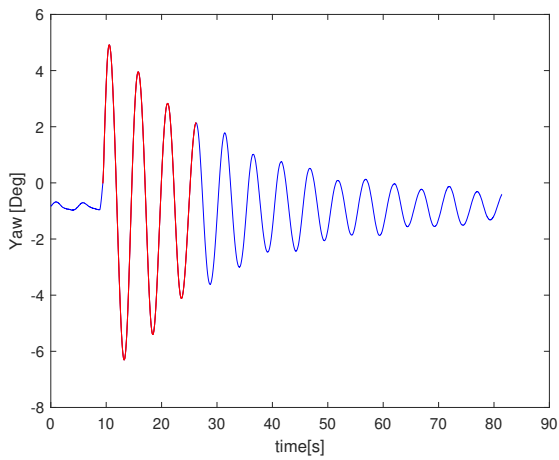


(a) Decay roll, forankret

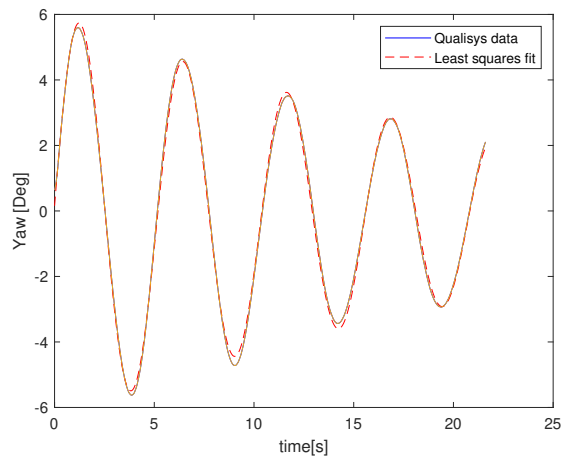


(b) Decay roll med square fit, forankret

Figur 67: Decay tester roll

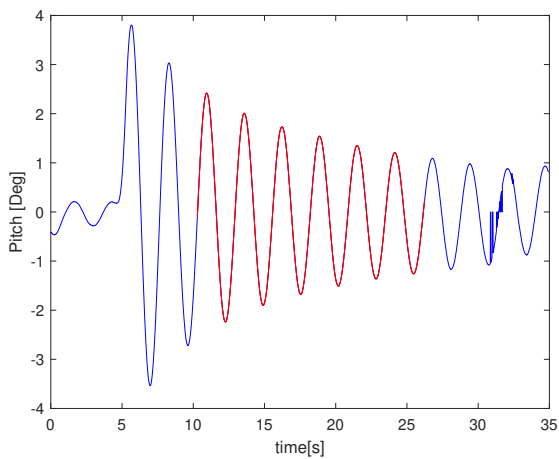


(a) Decay yaw, forankret

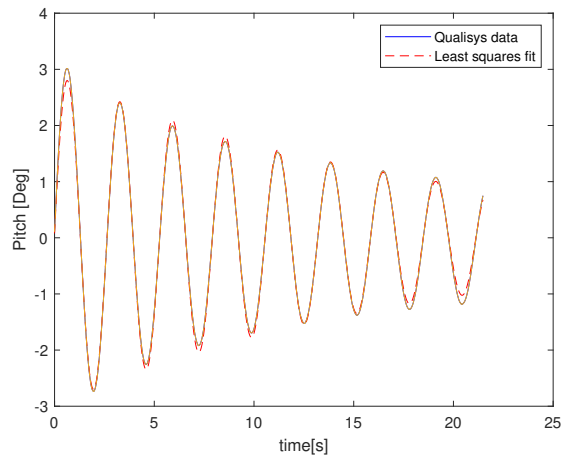


(b) Decay yaw med square fit, forankret

Figur 68: Decay tester yaw



(a) Decay pitch, uten forankring

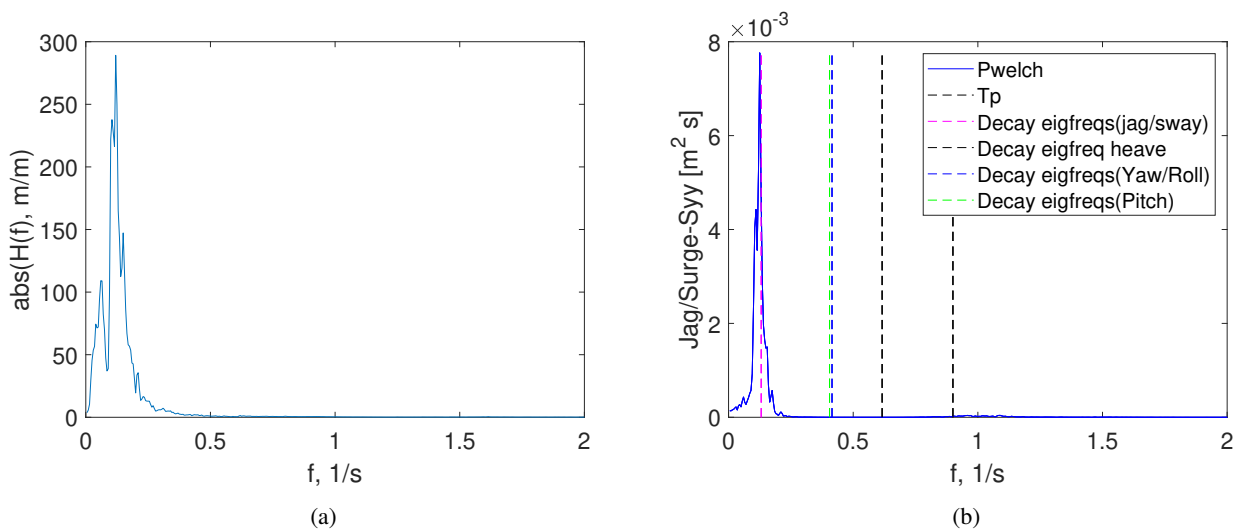


(b) Figur a viser modellens RAO i jag, figur b viser modellens respons i jag ved $H_s = 0,062$ $T_p = 0,9$

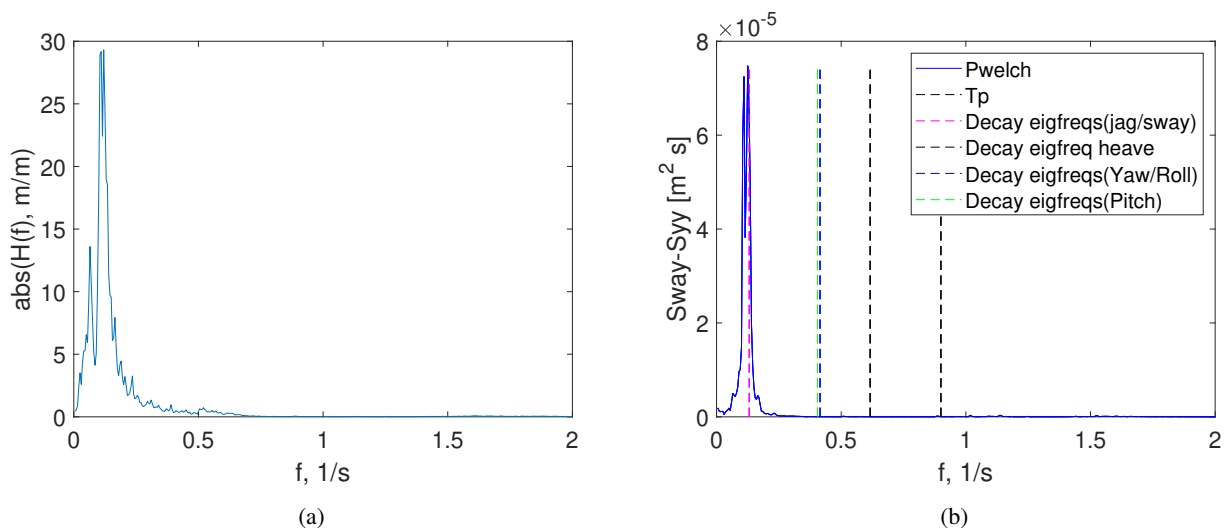
Figur 69: Decay tester yaw

Vedlegg D: RAO og respons

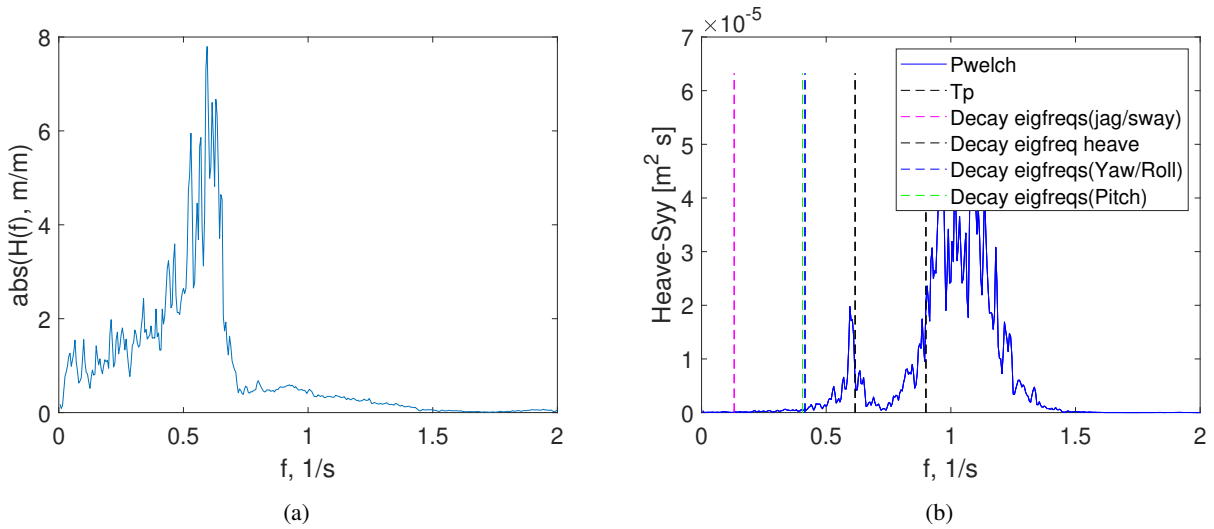
.0.1 Jonswap 0 grader



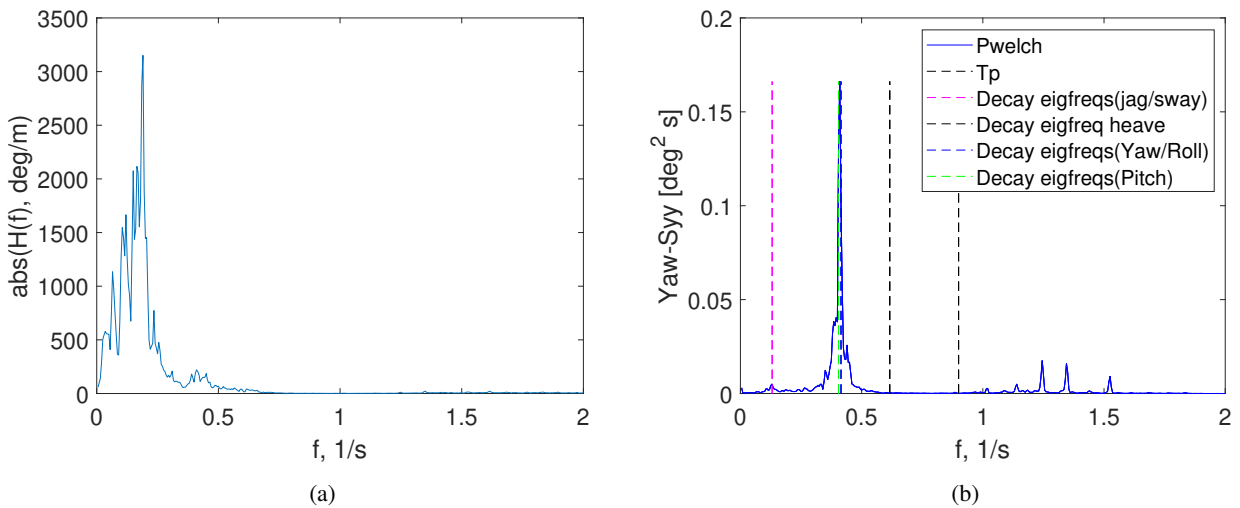
Figur 70: Figur a viser modellens RAO i jag, figur b viser modellens respons i jag ved $H_s = 0,062$ $T_p = 0,9$



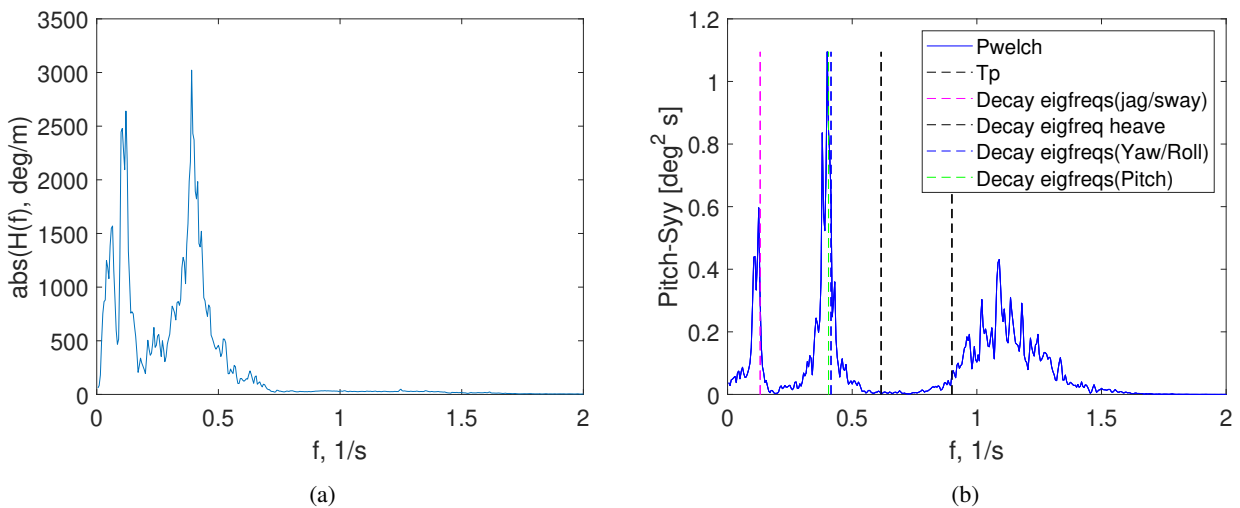
Figur 71: Figur a viser modellens RAO i sway, figur b viser modellens respons i sway ved $H_s = 0,062$ $T_p = 0,9$



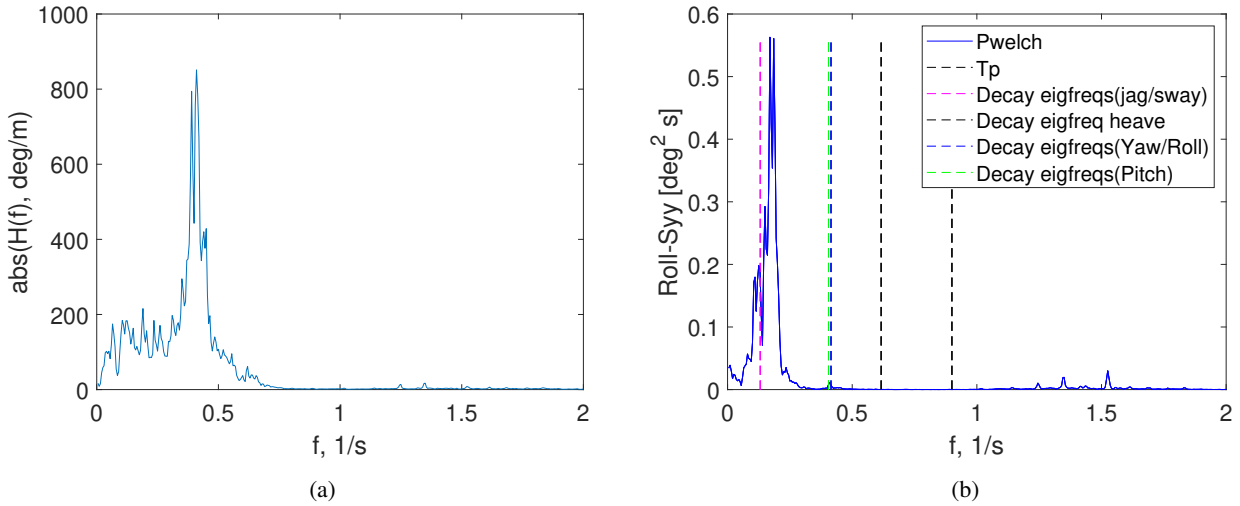
Figur 72: Figur a viser modellens RAO i heave, figur b viser modellens respons i heave ved $H_s = 0,062$ $T_p = 0,9$



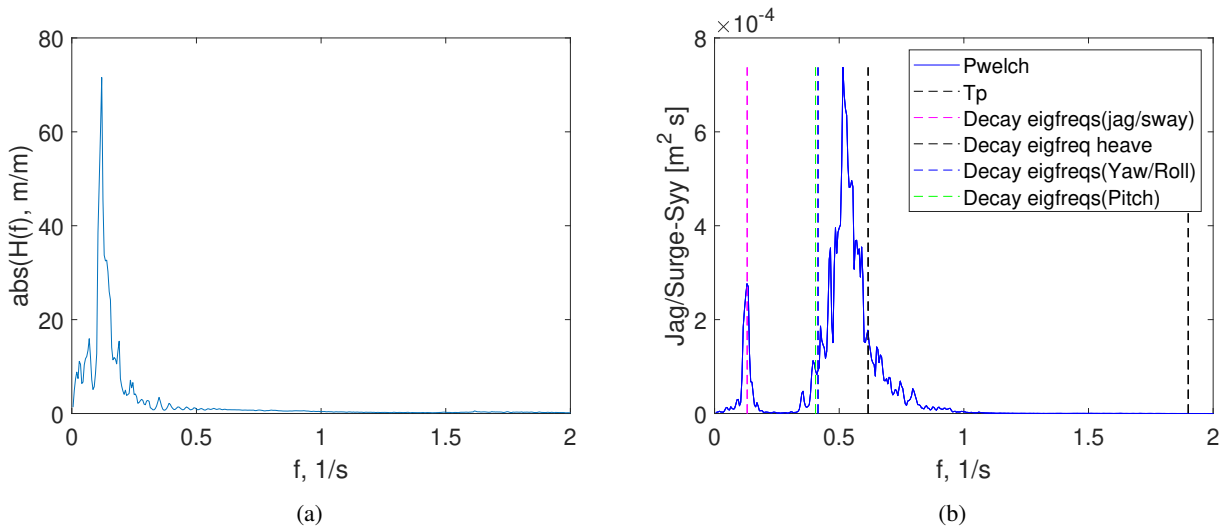
Figur 73: Figur a viser modellens RAO i yaw, figur b viser modellens respons i yaw ved $H_s = 0,062$ $T_p = 0,9$



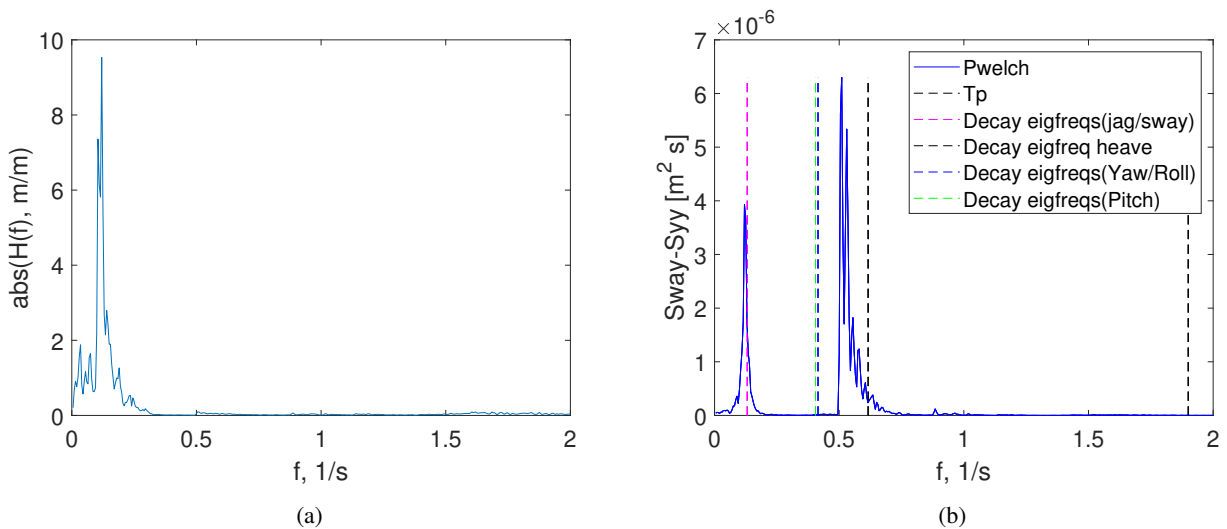
Figur 74: Figur a viser modellens RAO i pitch, figur b viser modellens respons i pitch ved $H_s = 0,062$ $T_p = 0,9$



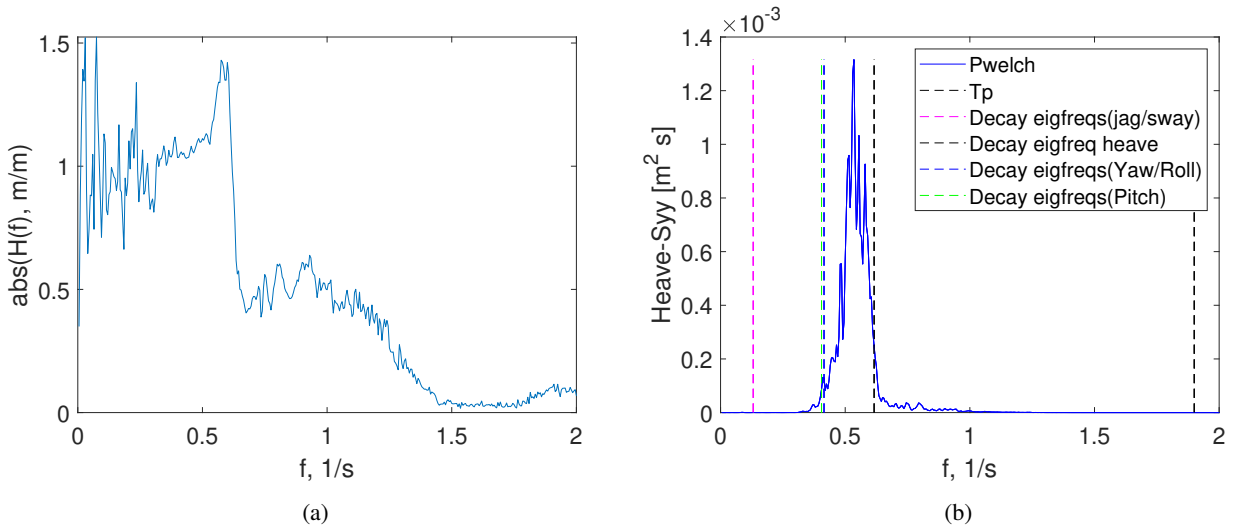
Figur 75: Figur a viser modellens RAO i roll, figur b viser modellens respons i roll ved $H_s = 0,062$ $T_p = 0,9$



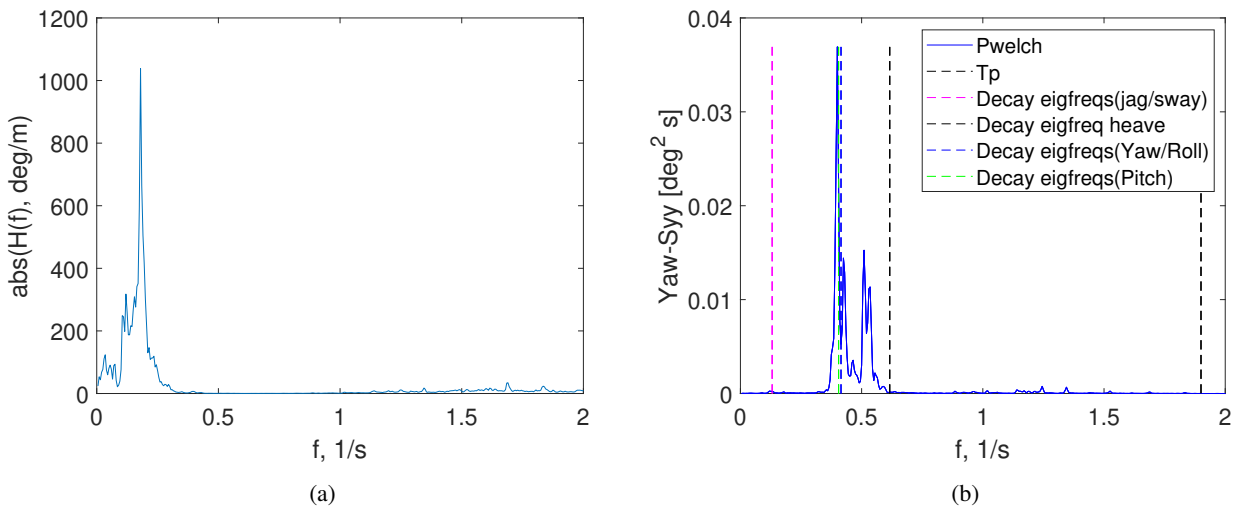
Figur 76: Figur a viser modellens RAO i jag, figur b viser modellens respons i jag ved $H_s = 0,062$ $T_p = 1,9$



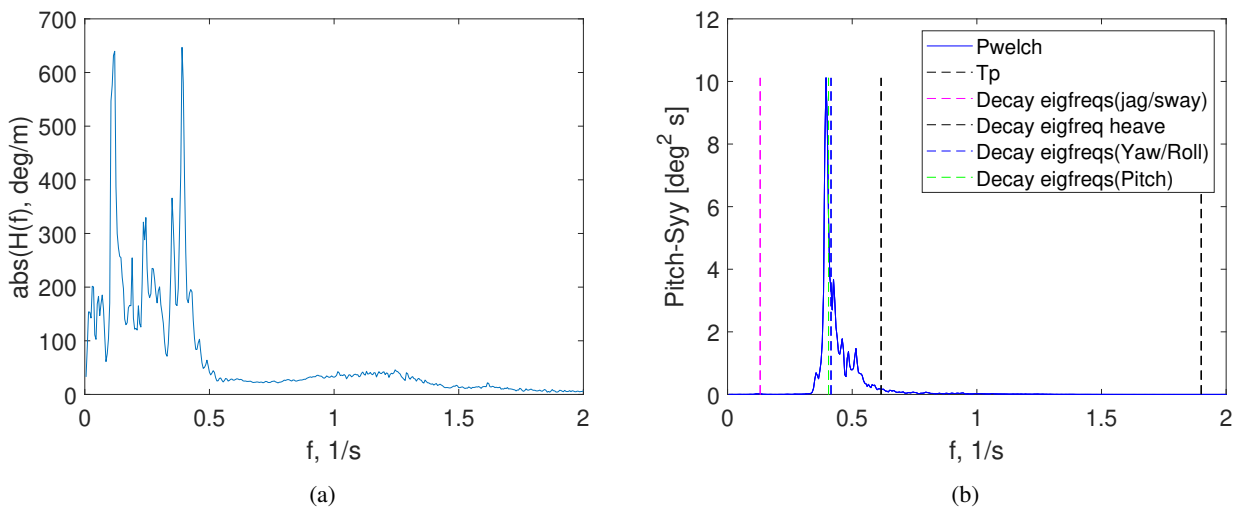
Figur 77: Figur a viser modellens RAO i sway, figur b viser modellens respons i sway ved $H_s = 0,062$ $T_p = 1,9$



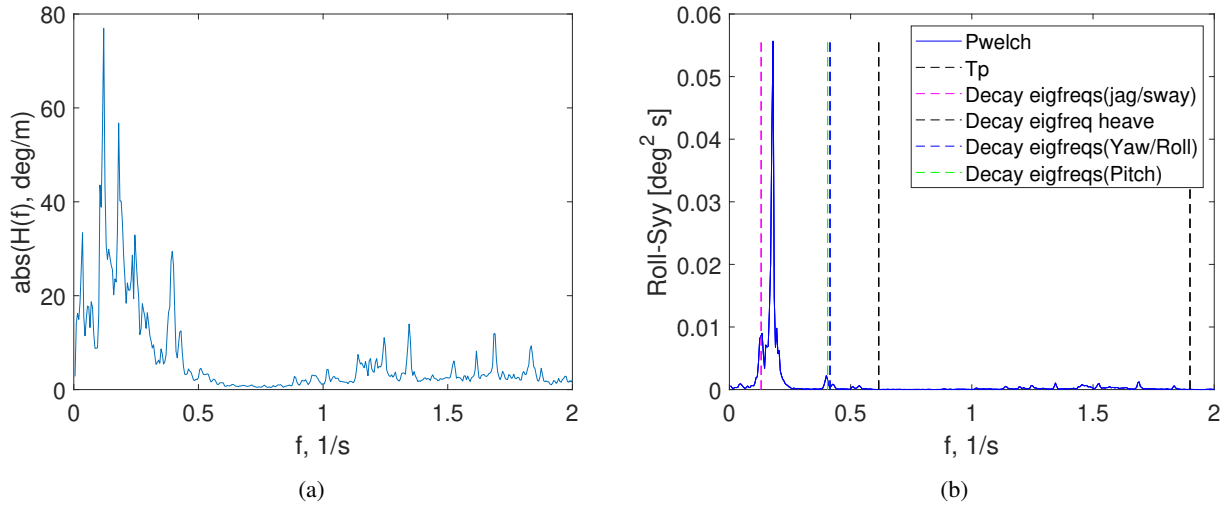
Figur 78: Figur a viser modellens RAO i heave, figur b viser modellens respons i heave ved $H_s = 0,062$ $T_p = 1,9$



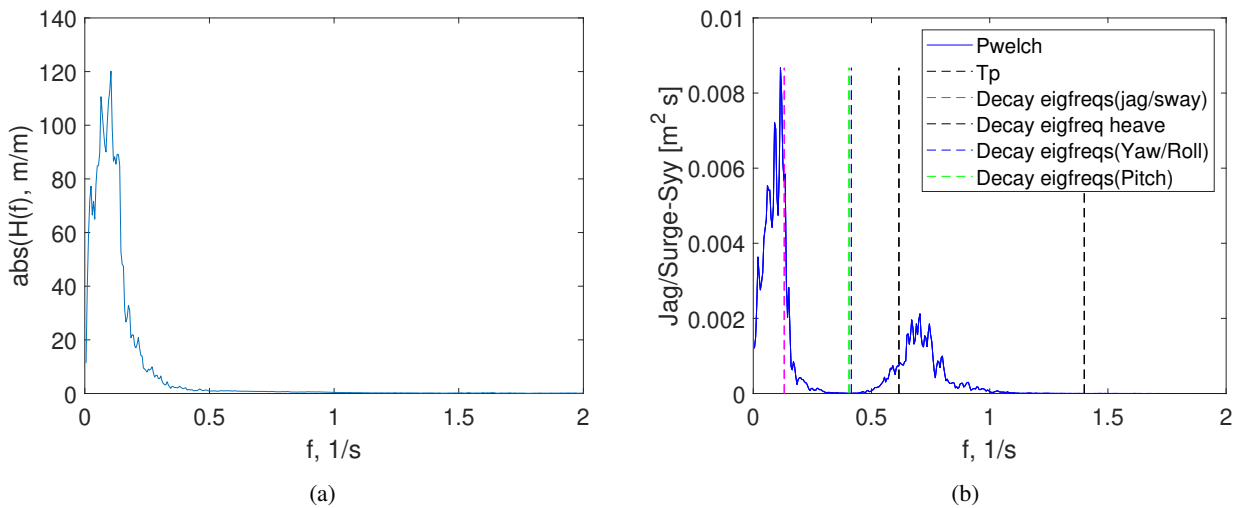
Figur 79: Figur a viser modellens RAO i yaw, figur b viser modellens respons i yaw ved $H_s = 0,062$ $T_p = 1,9$



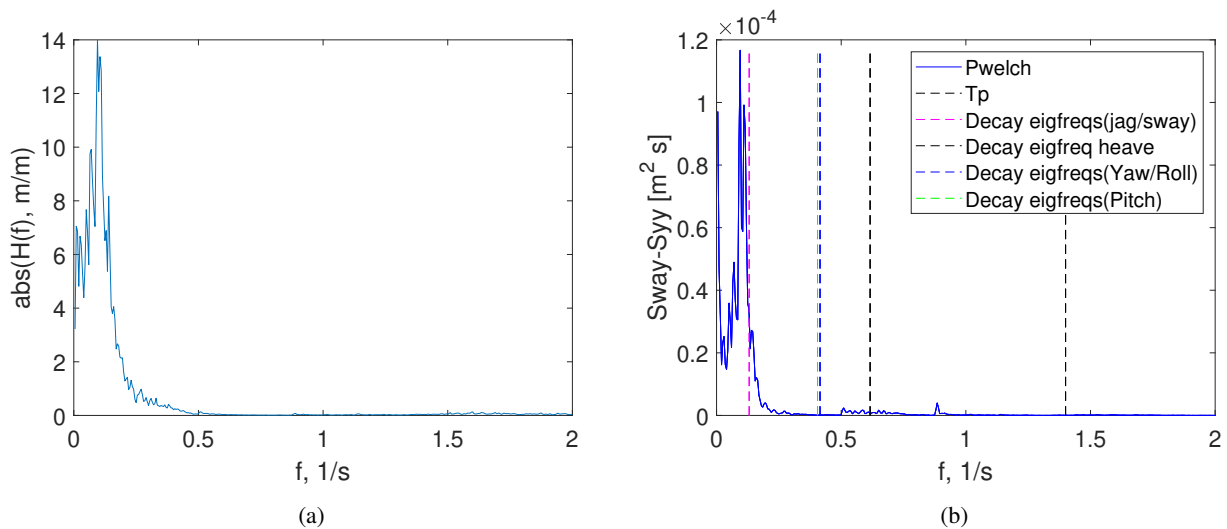
Figur 80: Figur a viser modellens RAO i pitch, figur b viser modellens respons i pitch ved $H_s = 0,062$ $T_p = 1,9$



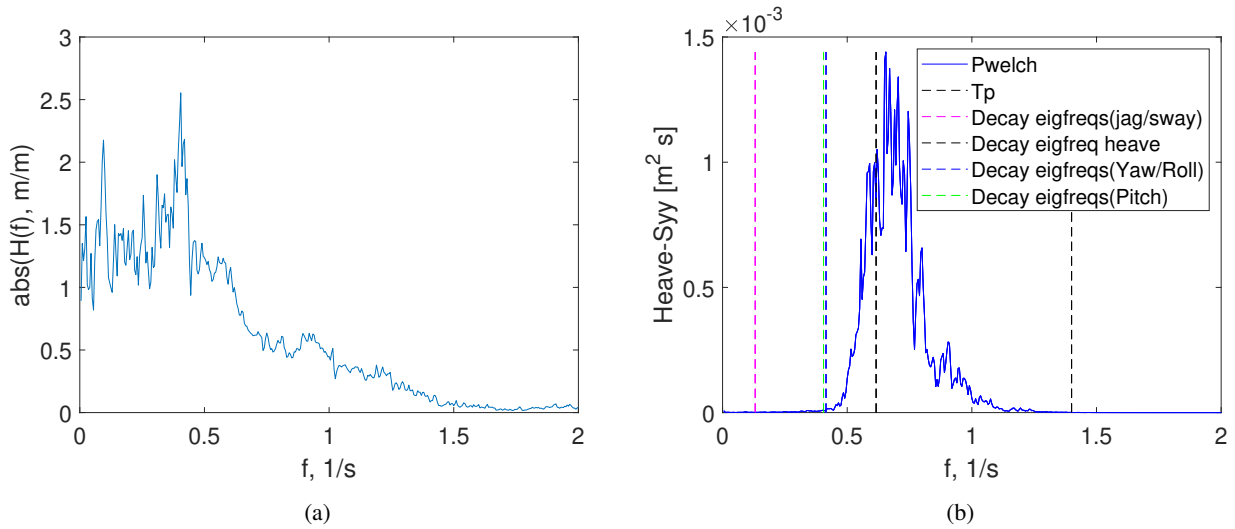
Figur 81: Figur a viser modellens RAO i roll, figur b viser modellens respons i roll ved $H_s = 0,062$ $T_p = 1,9$



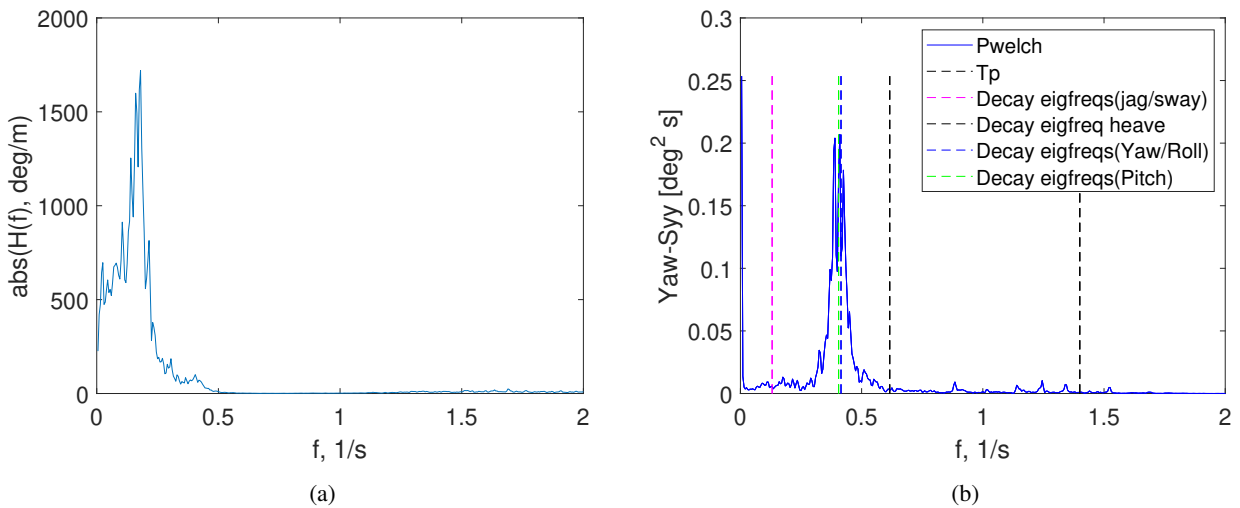
Figur 82: Figur a viser modellens RAO i jag, figur b viser modellens respons i jag ved $H_s = 0,15$ $T_p = 1,4$



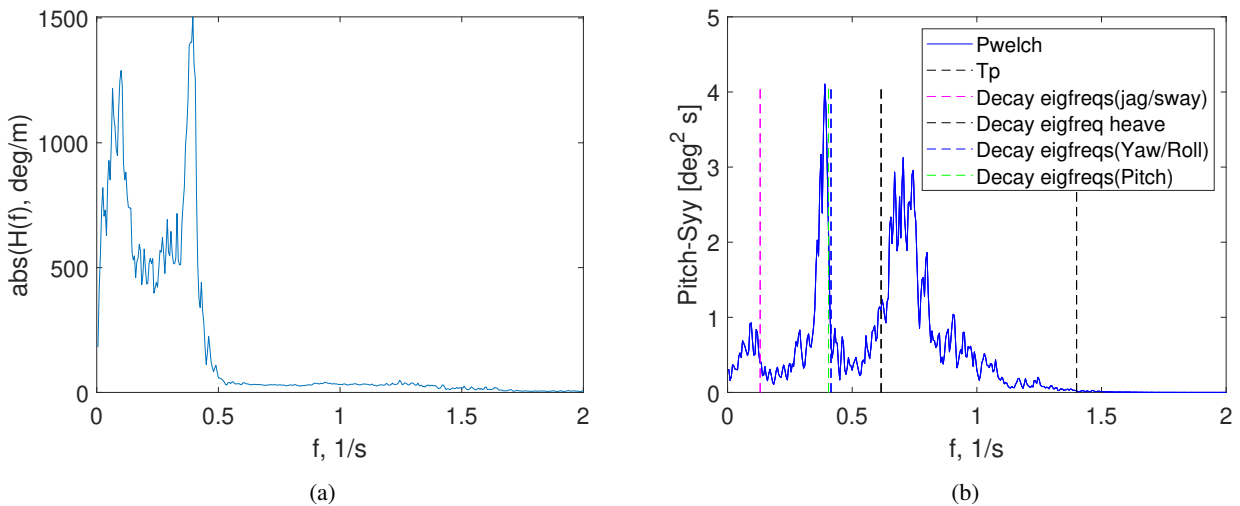
Figur 83: Figur a viser modellens RAO i sway, figur b viser modellens respons i sway ved $H_s = 0,15$ $T_p = 1,4$



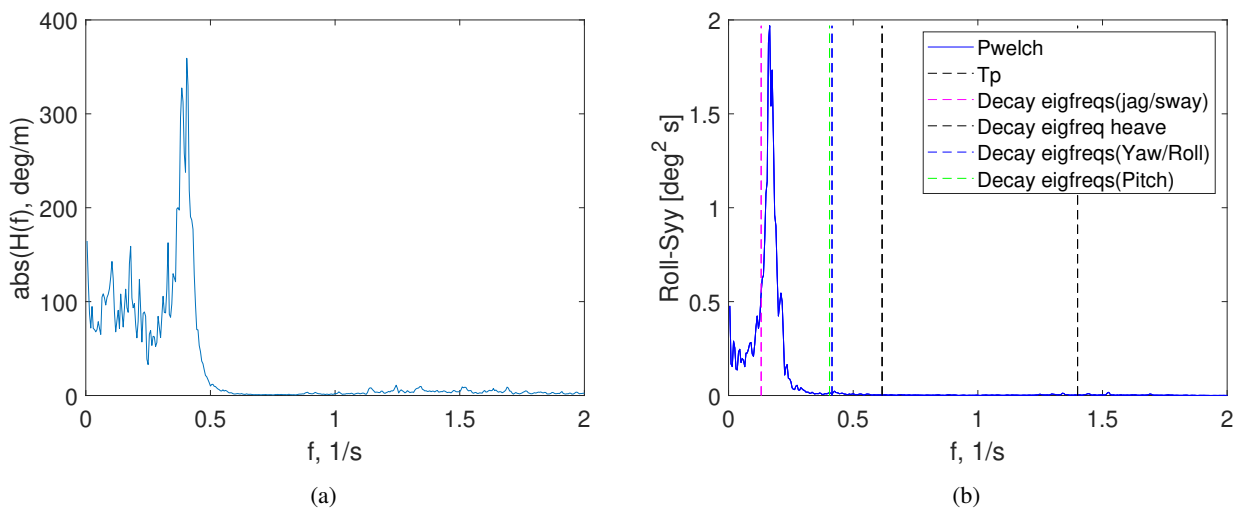
Figur 84: Figur a viser modellens RAO i heave, figur b viser modellens respons i heave ved $H_s = 0,15$ $T_p = 1,4$



Figur 85: Figur a viser modellens RAO i yaw, figur b viser modellens respons i yaw ved $H_s = 0,15$ $T_p = 1,4$

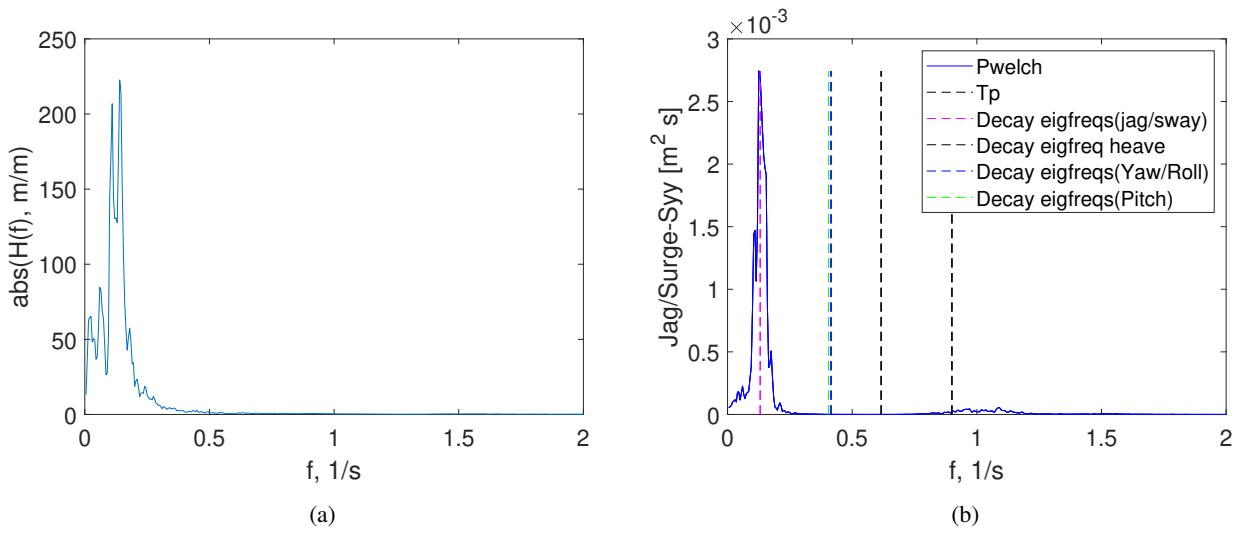


Figur 86: Figur a viser modellens RAO i pitch, figur b viser modellens respons i pitch ved $H_s = 0,15$ $T_p = 1,4$

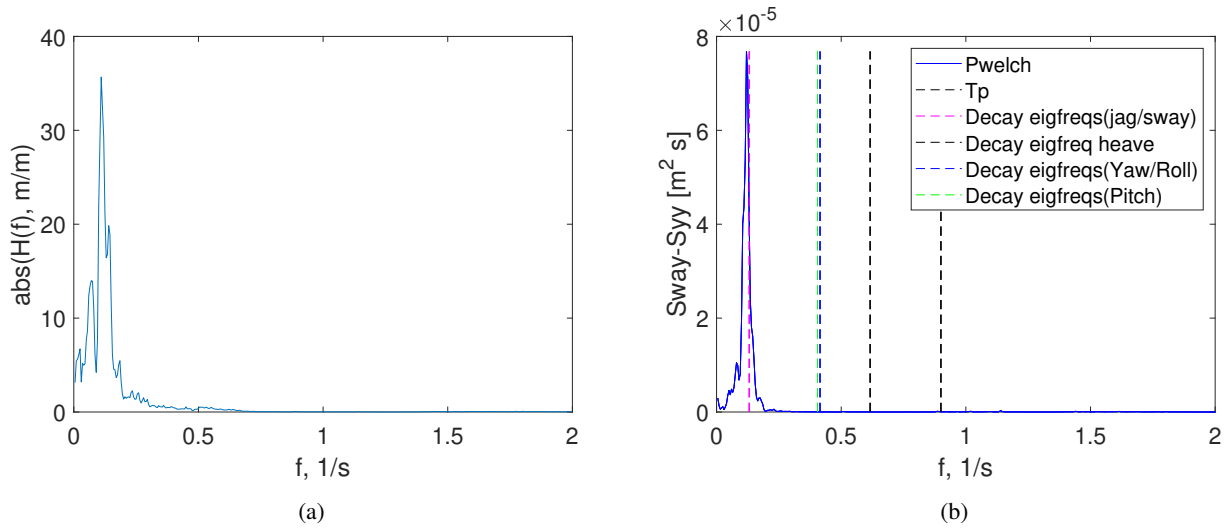


Figur 87: Figur a viser modellens RAO i roll, figur b viser modellens respons i roll ved $H_s = 0,15$ $T_p = 1,4$

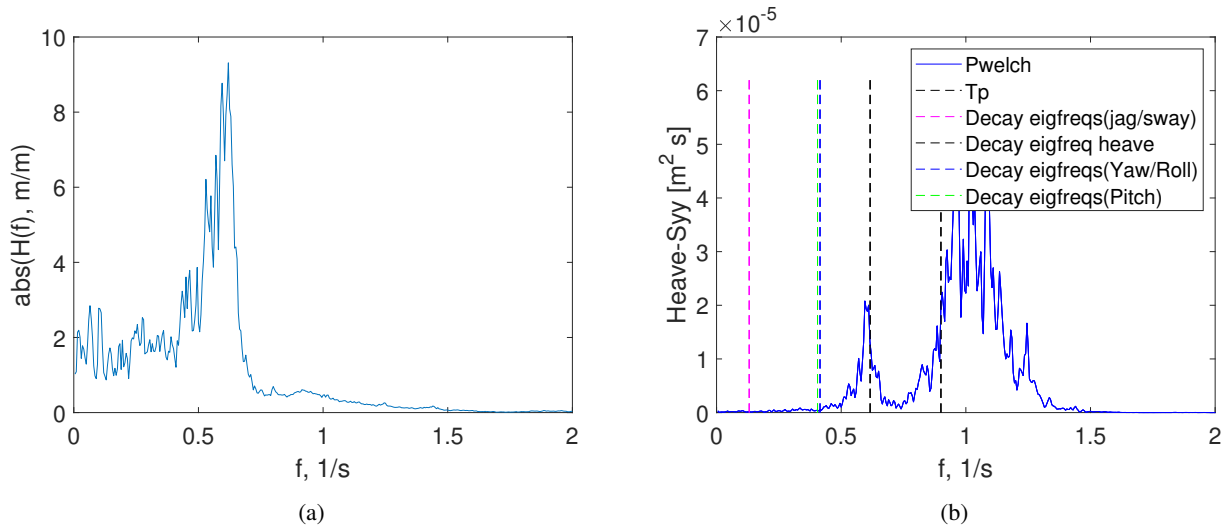
.02 Jonswap 180 grader



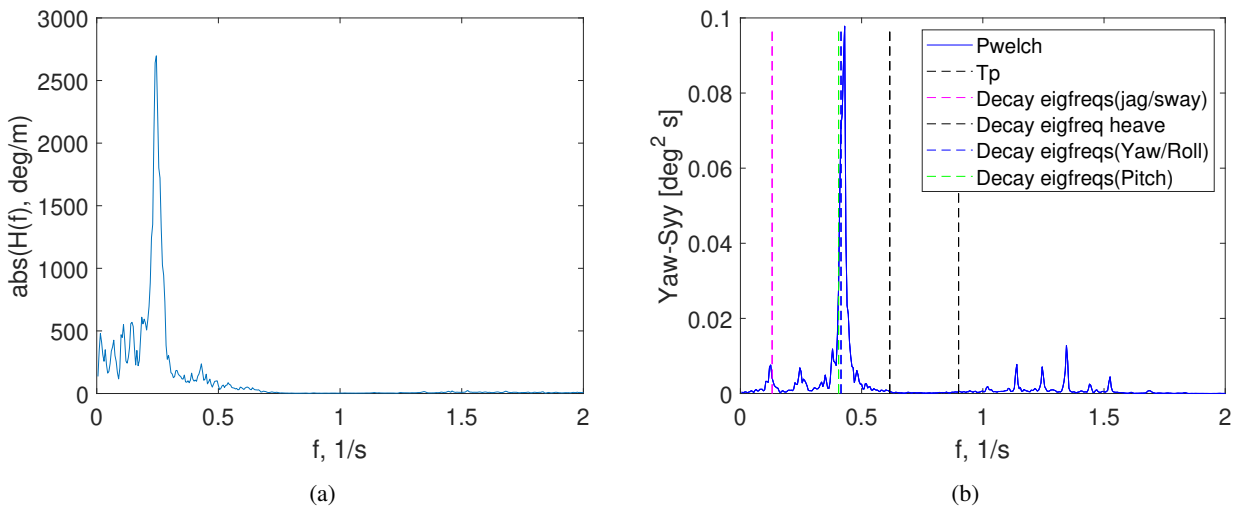
Figur 88: Figur a viser modellens RAO i jag, figur b viser modellens respons i jag ved $H_s = 0,062$ $T_p = 0,9$



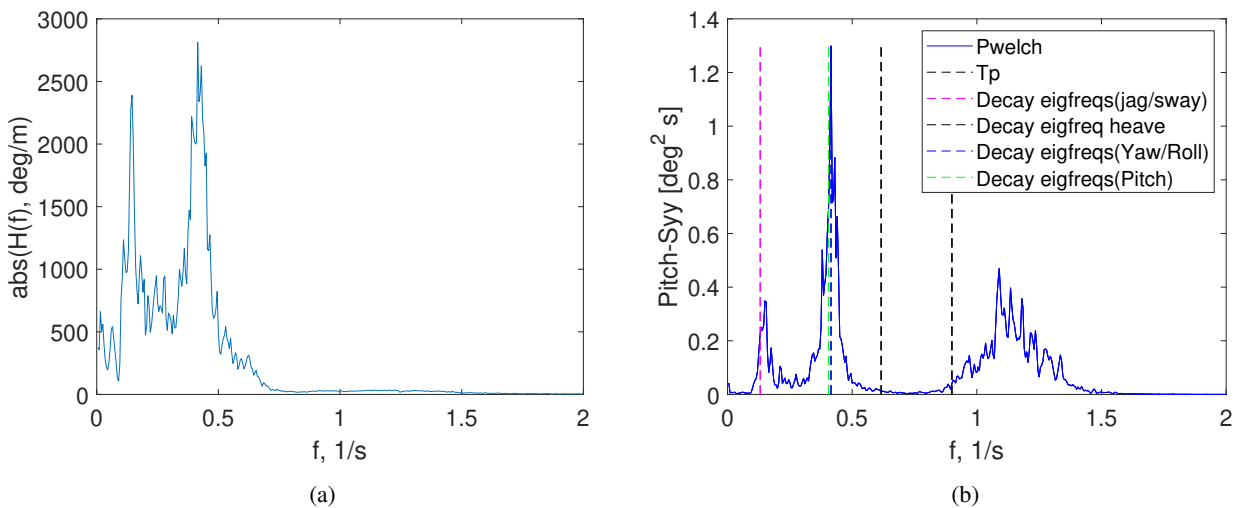
Figur 89: Figur a viser modellens RAO i sway, figur b viser modellens respons i sway ved $H_s = 0,062$ $T_p = 0,9$



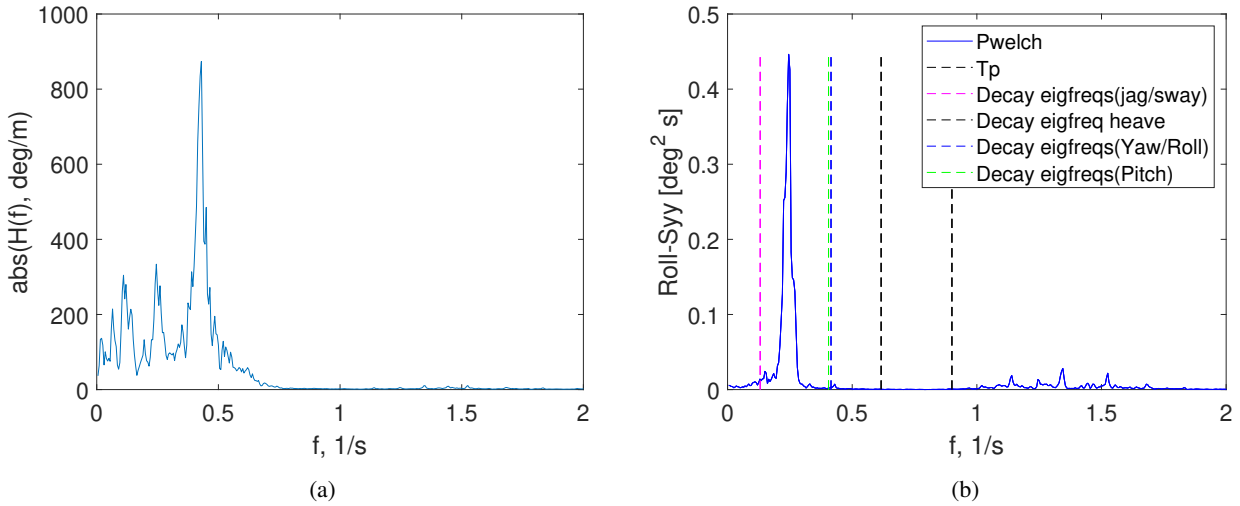
Figur 90: Figur a viser modellens RAO i heave, figur b viser modellens respons i heave ved $H_s = 0,062$ $T_p = 0,9$



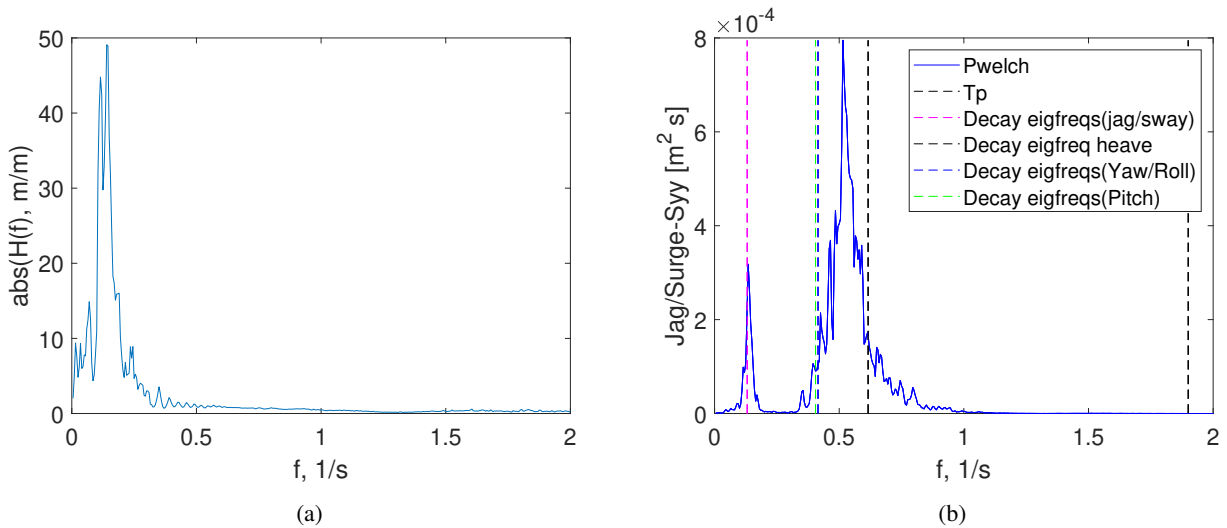
Figur 91: Figur a viser modellens RAO i yaw, figur b viser modellens respons i yaw ved $H_s = 0,062$ $T_p = 0,9$



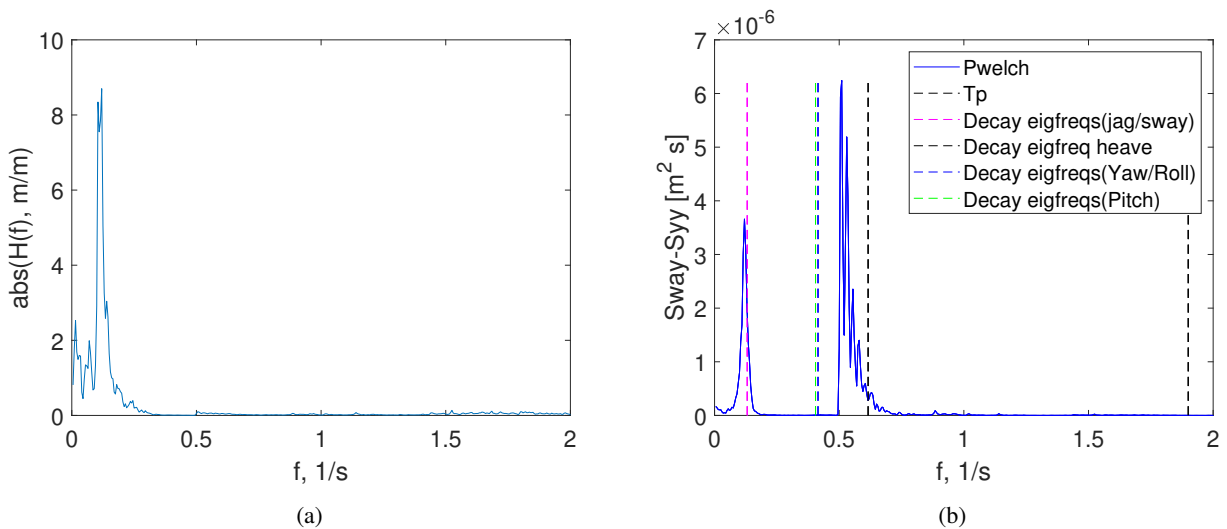
Figur 92: Figur a viser modellens RAO i pitch, figur b viser modellens respons i pitch ved $H_s = 0,062$ $T_p = 0,9$



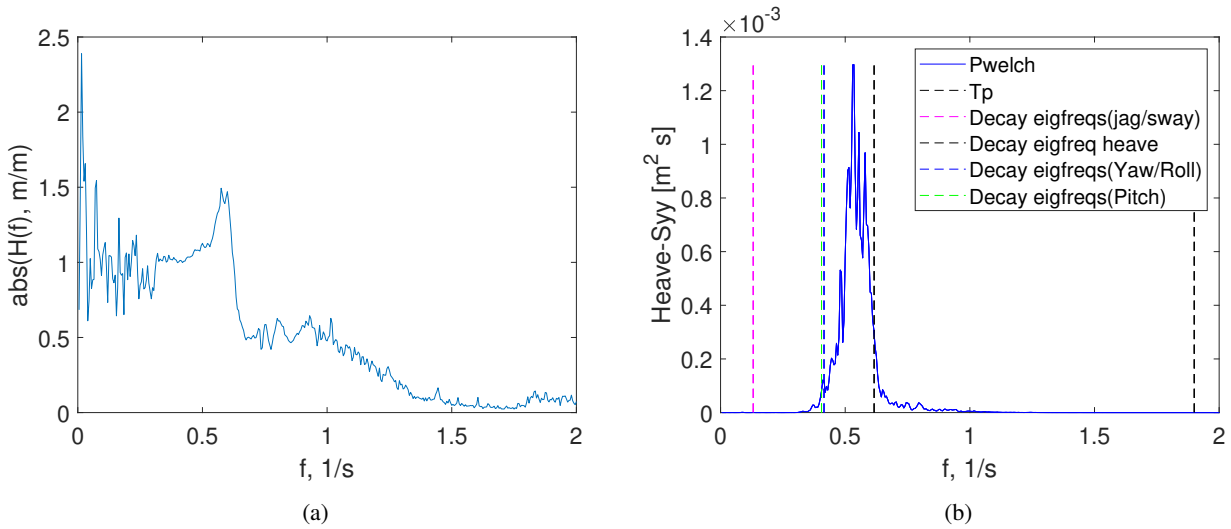
Figur 93: Figur a viser modellens RAO i roll, figur b viser modellens respons i roll ved $H_s = 0,062$ $T_p = 0,9$



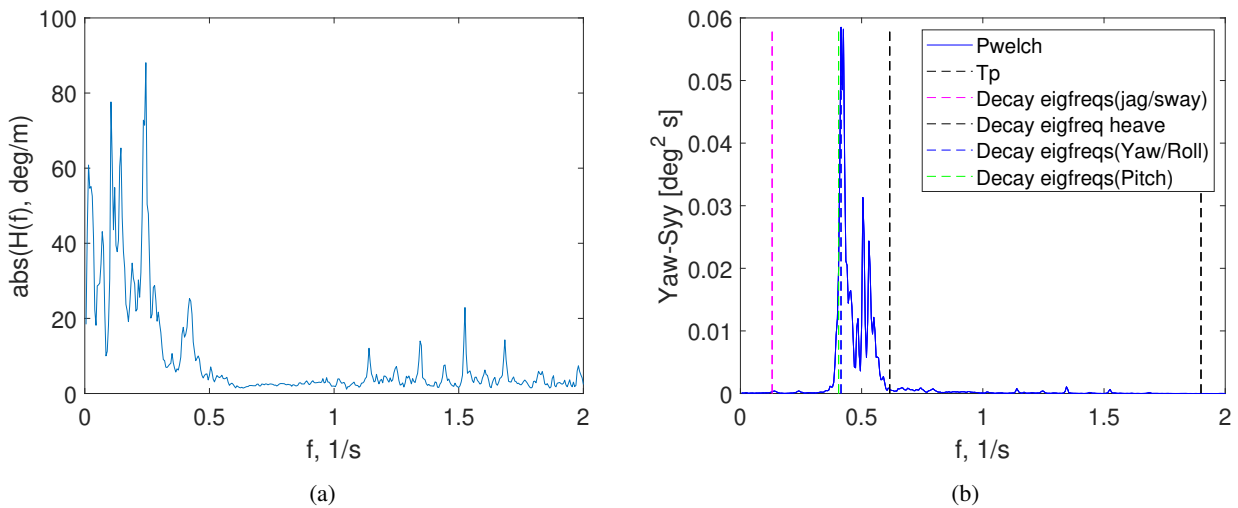
Figur 94: Figur a viser modellens RAO i jag, figur b viser modellens respons i jag ved $H_s = 0,062$ $T_p = 1,9$



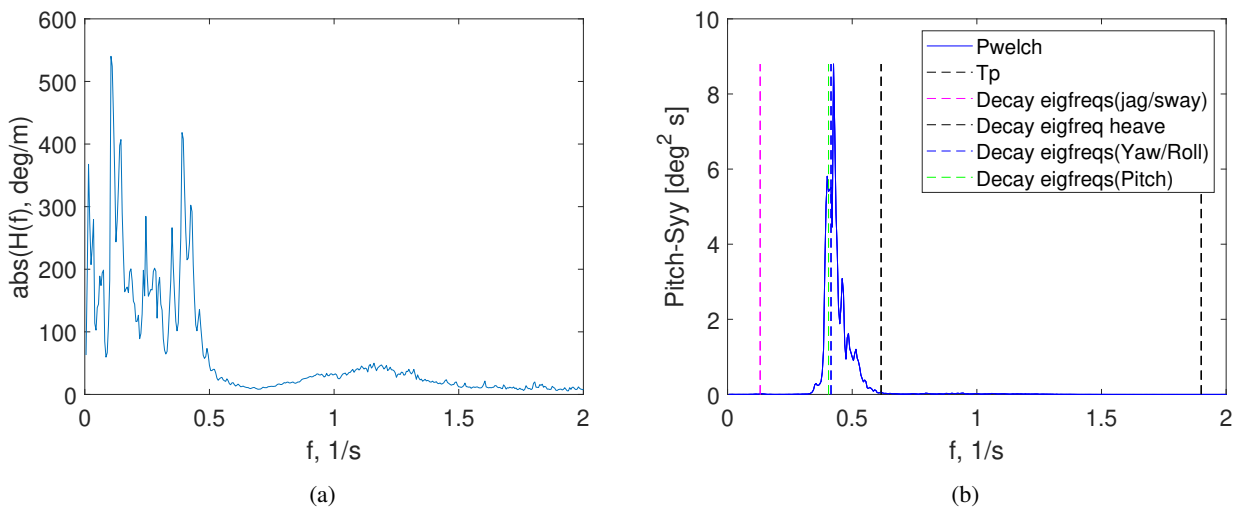
Figur 95: Figur a viser modellens RAO i sway, figur b viser modellens respons i sway ved $H_s = 0,062$ $T_p = 1,9$



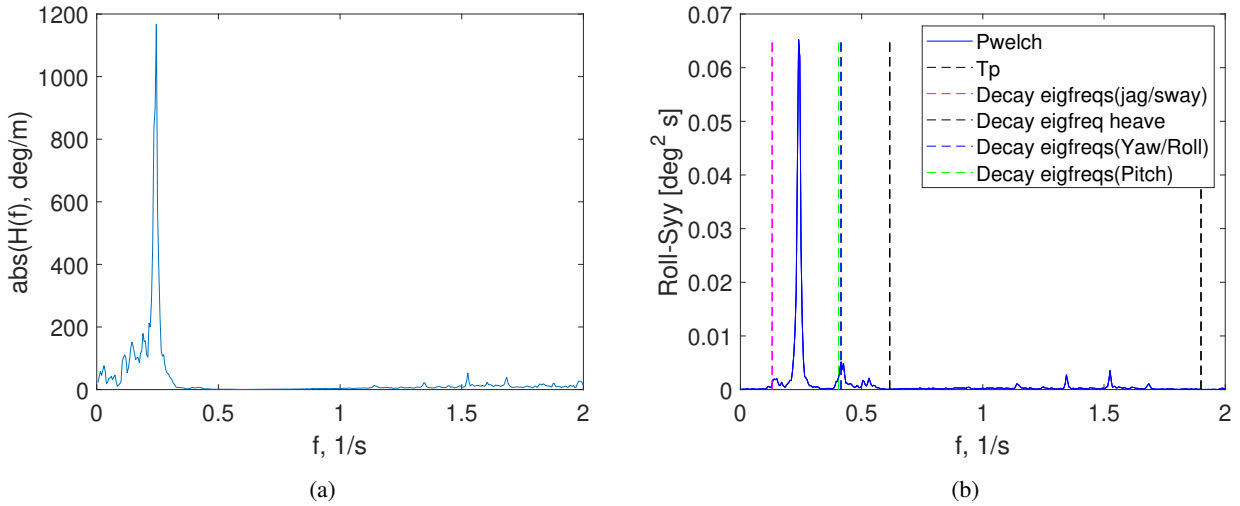
Figur 96: Figur a viser modellens RAO i heave, figur b viser modellens respons i heave ved $H_s = 0,062$ $T_p = 1,9$



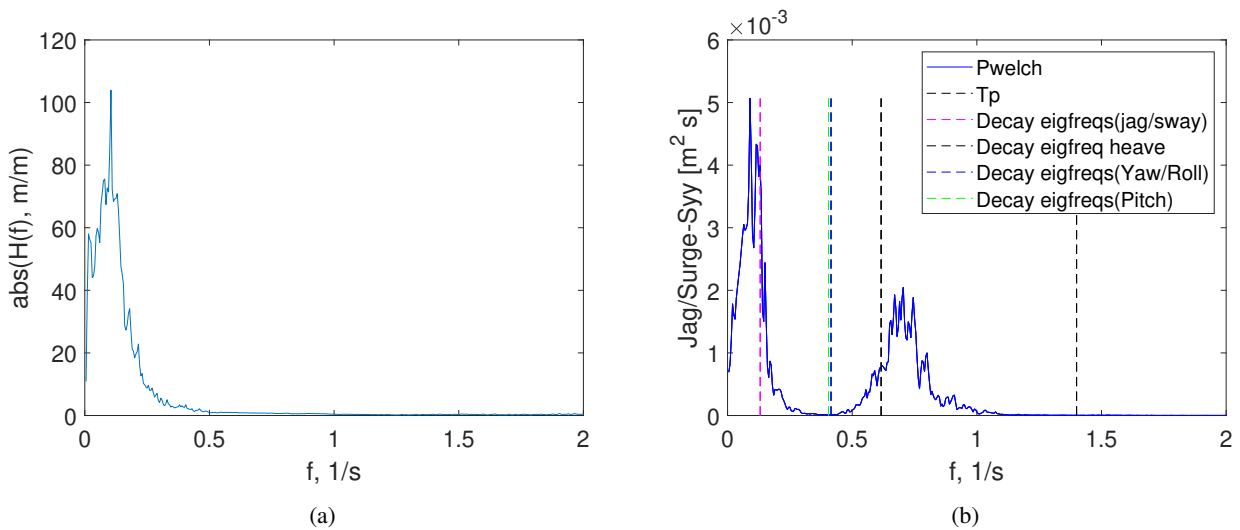
Figur 97: Figur a viser modellens RAO i yaw, figur b viser modellens respons i yaw ved $H_s = 0,062$ $T_p = 1,9$



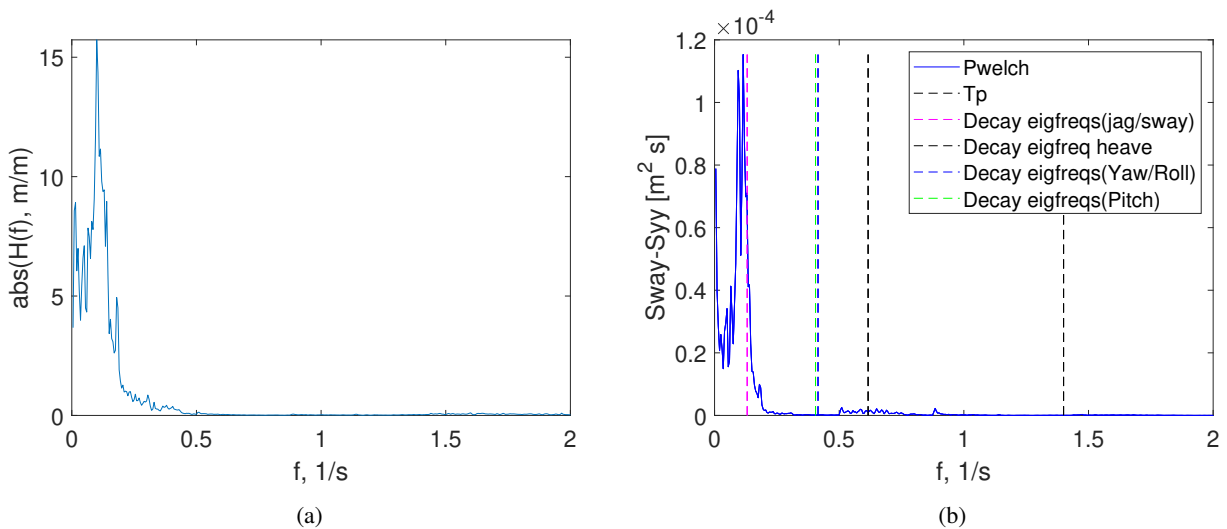
Figur 98: Figur a viser modellens RAO i pitch, figur b viser modellens respons i pitch ved $H_s = 0,062$ $T_p = 1,9$



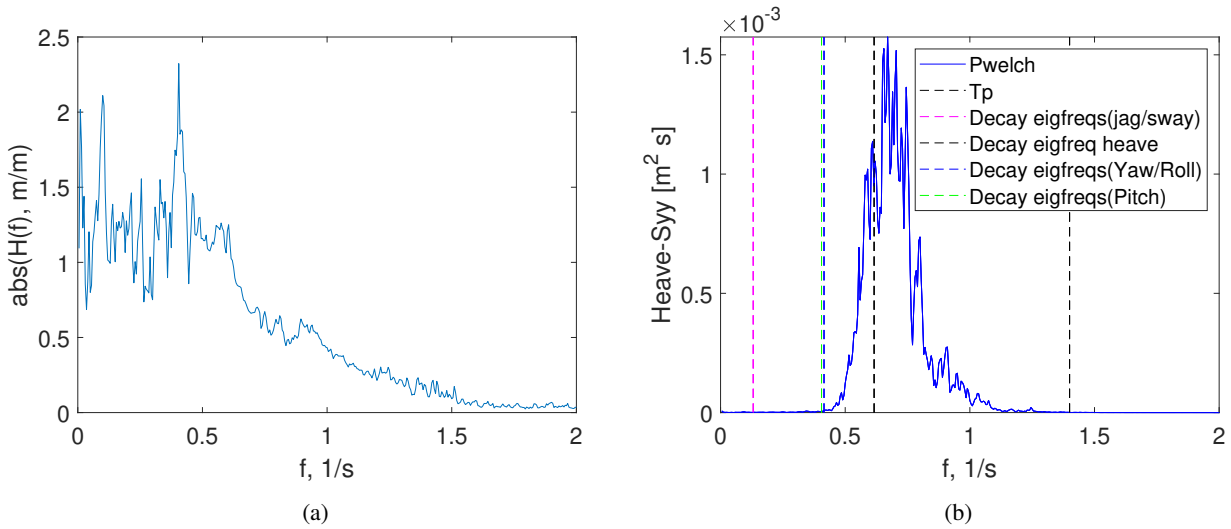
Figur 99: Figur a viser modellens RAO i roll, figur b viser modellens respons i roll ved $H_s = 0,062$ $T_p = 1,9$



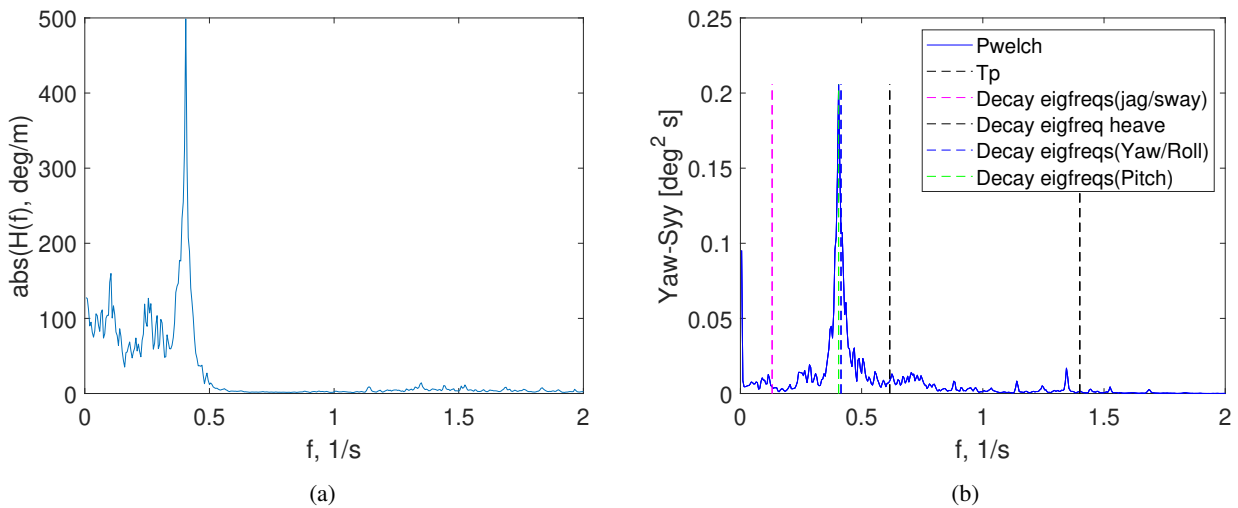
Figur 100: Figur a viser modellens RAO i jag, figur b viser modellens respons i jag ved $H_s = 0,15$ $T_p = 1,4$



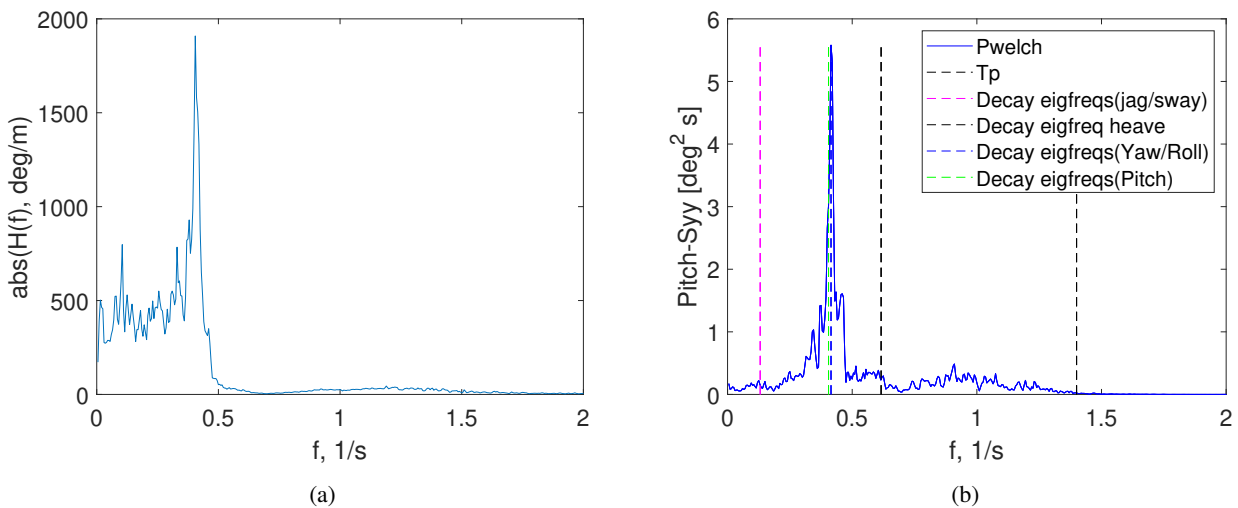
Figur 101: Figur a viser modellens RAO i sway, figur b viser modellens respons i sway ved $H_s = 0,15$ $T_p = 1,4$



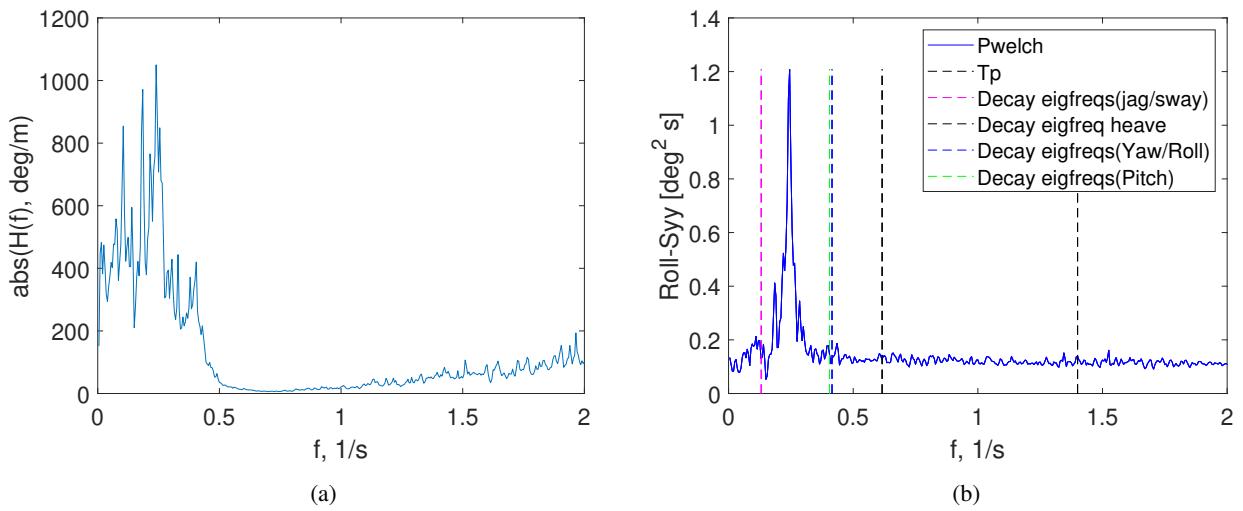
Figur 102: Figur a viser modellens RAO i heave, figur b viser modellens respons i heave ved $H_s = 0,15$ $T_p = 1,4$



Figur 103: Figur a viser modellens RAO i yaw, figur b viser modellens respons i yaw ved $H_s = 0,15$ $T_p = 1,4$

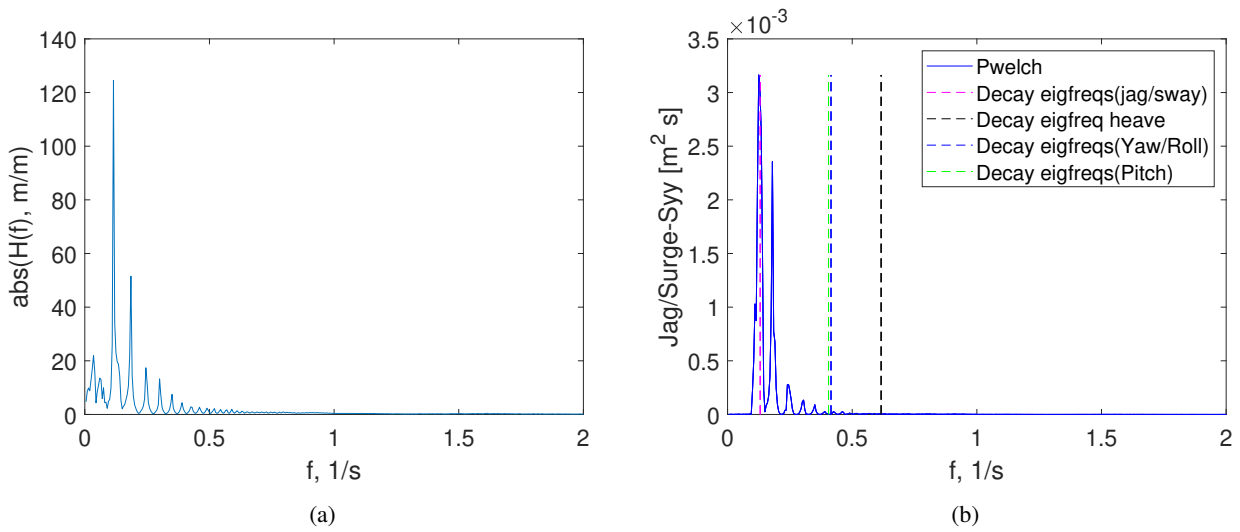


Figur 104: Figur a viser modellens RAO i pitch, figur b viser modellens respons i pitch ved $H_s = 0,15$ $T_p = 1,4$

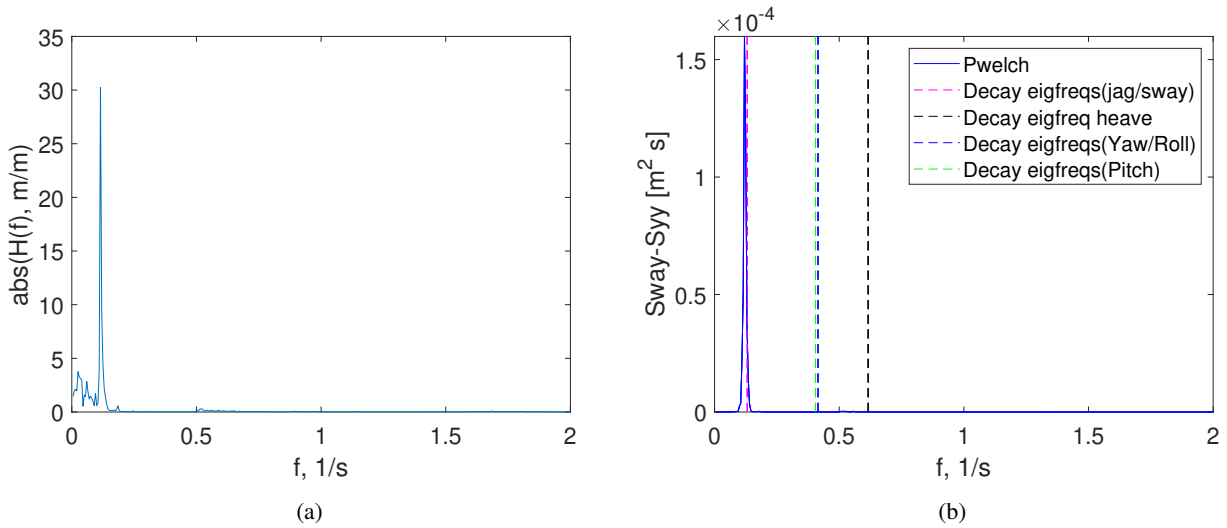


Figur 105: Figur a viser modellens RAO i roll, figur b viser modellens respons i roll ved $H_s = 0,15$ $T_p = 1,4$

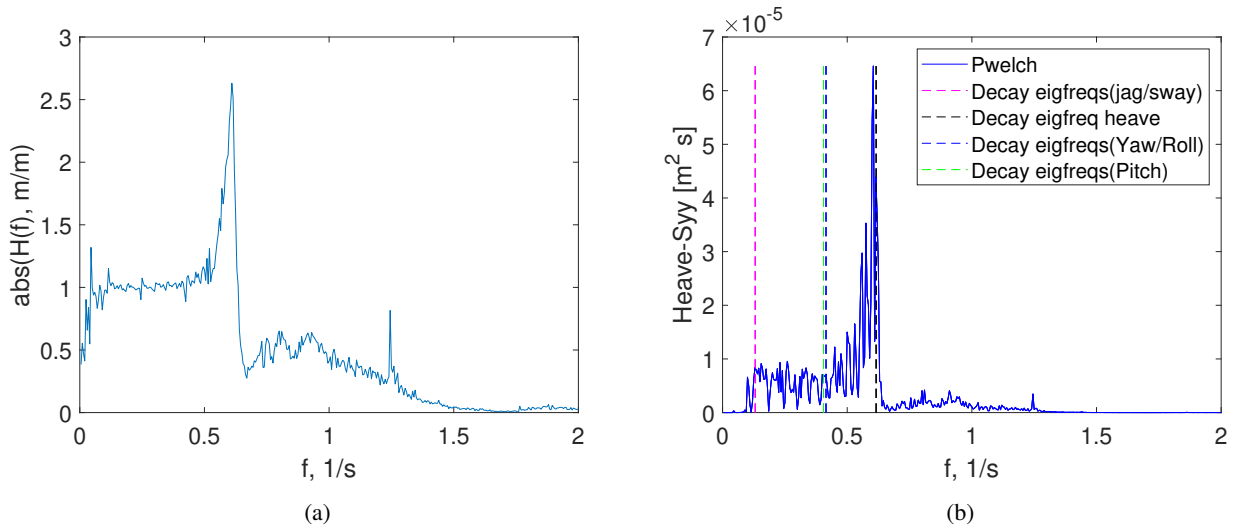
.03 hvit støy 0 grader



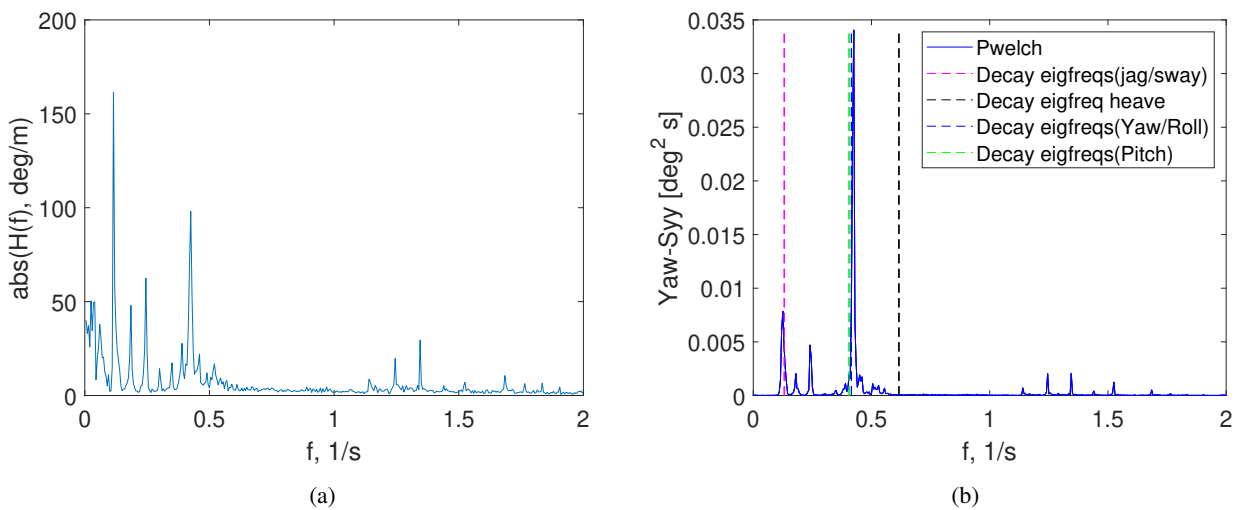
Figur 106: Figur a viser modellens RAO i jag, figur b viser modellens respons i jag ved $H_s = 0,02$ Frekvens 0,05 - 2



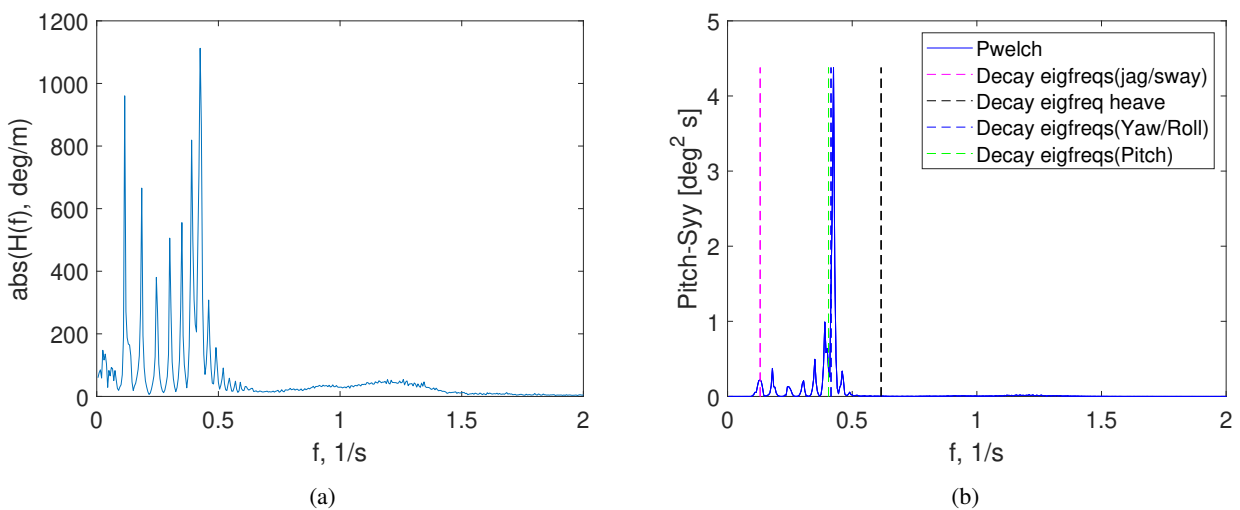
Figur 107: Figur a viser modellens RAO i sway, figur b viser modellens respons i sway ved $H_s = 0,02$ Frekvens 0,05 - 2



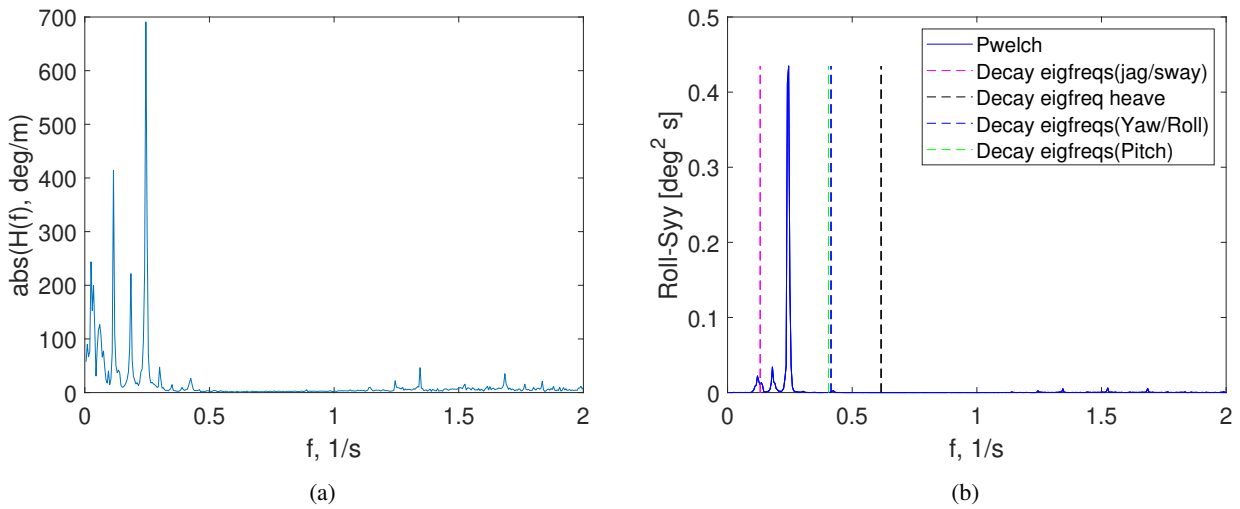
Figur 108: Figur a viser modellens RAO i heave, figur b viser modellens respons i heave ved $H_s = 0,02$ Frekvens 0,05 - 2



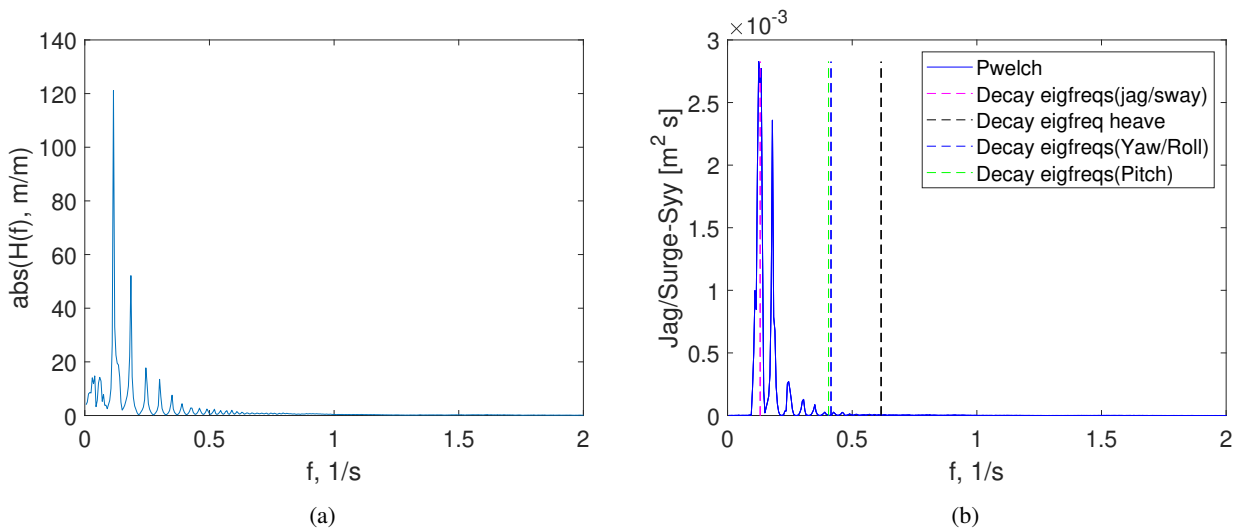
Figur 109: Figur a viser modellens RAO i yaw, figur b viser modellens respons i yaw ved $H_s = 0,02$ Frekvens 0,05 - 2



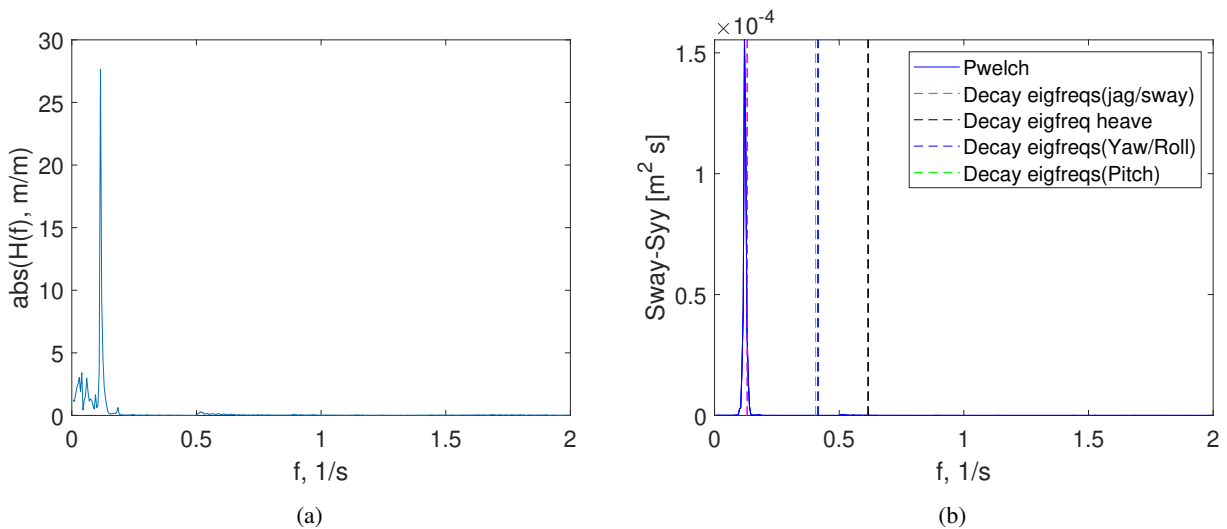
Figur 110: Figur a viser modellens RAO i pitch, figur b viser modellens respons i pitch ved $H_s = 0,02$ Frekvens 0,05 - 2



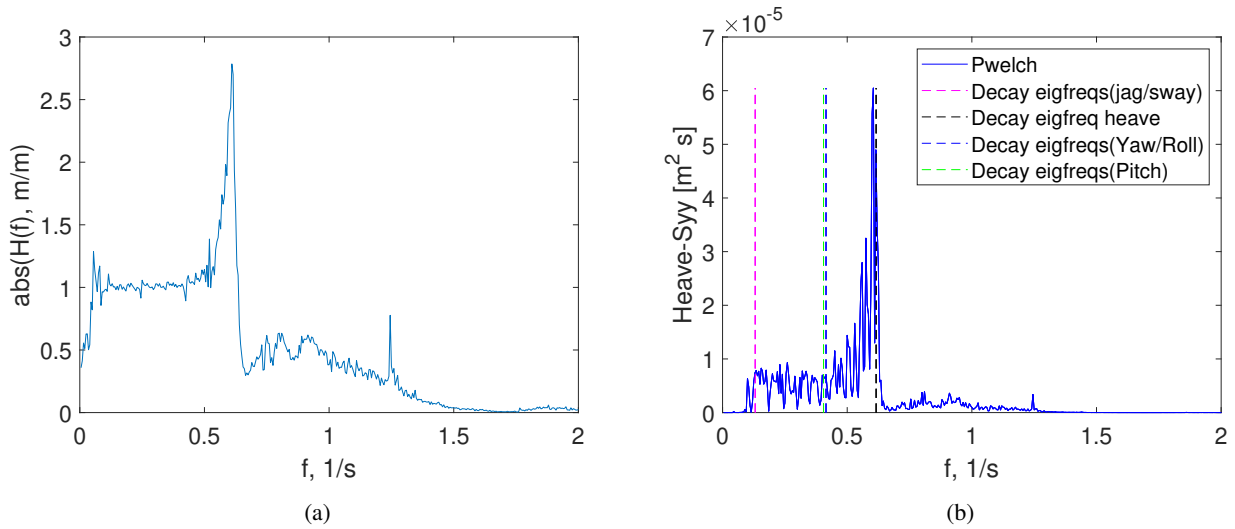
Figur 111: Figur a viser modellens RAO i roll, figur b viser modellens respons i roll ved $H_s = 0,02$ Frekvens 0,05 - 2



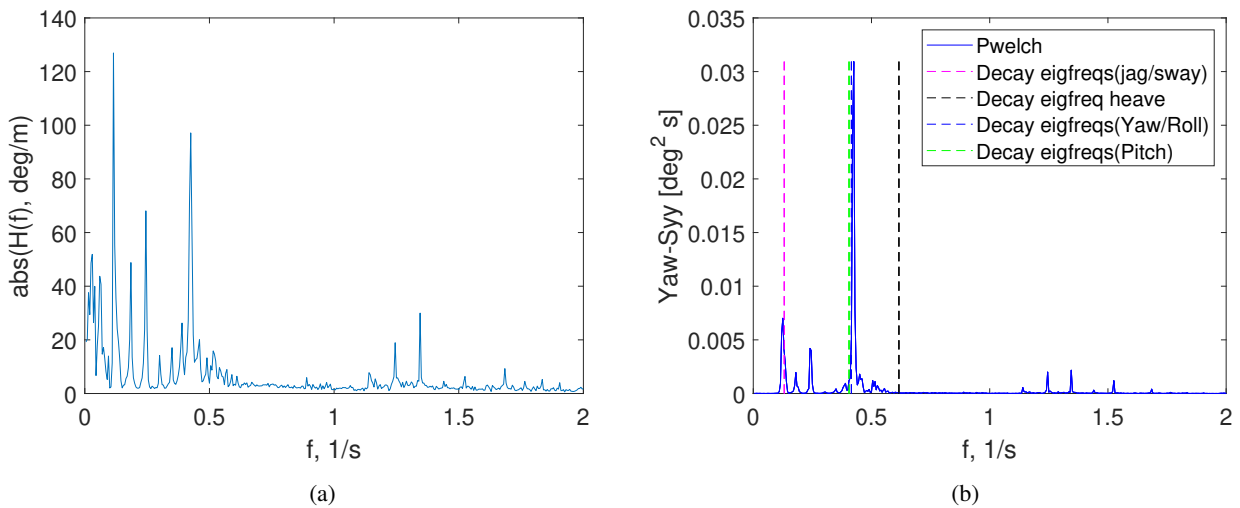
Figur 112: Figur a viser modellens RAO i jag, figur b viser modellens respons i jag ved $H_s = 0,02$ Frekvens 0,2 - 2



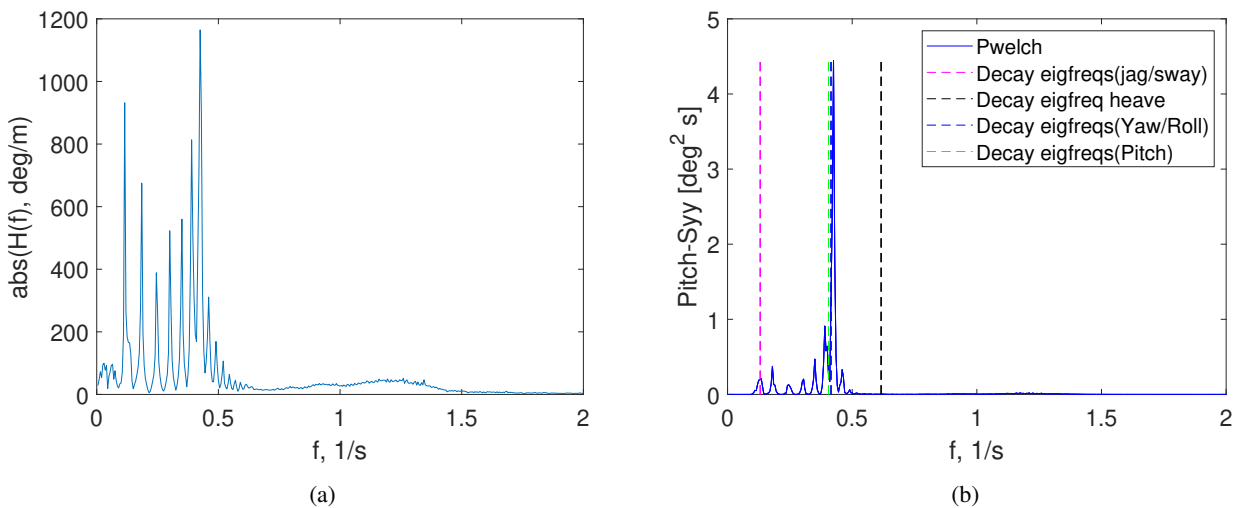
Figur 113: Figur a viser modellens RAO i sway, figur b viser modellens respons i sway ved $H_s = 0,02$ F rekvens 0,2 - 2



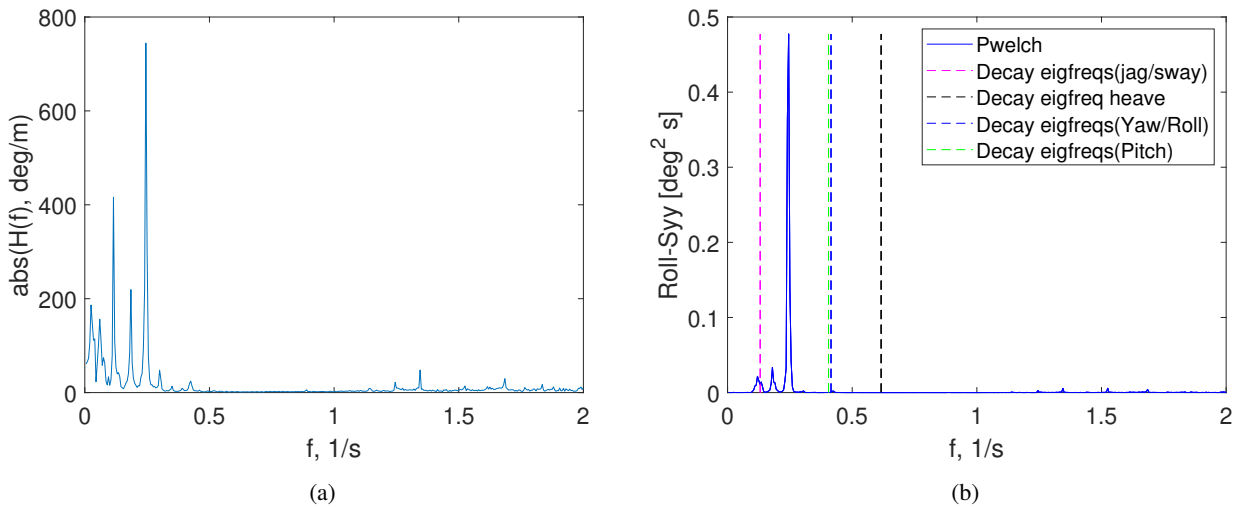
Figur 114: Figur a viser modellens RAO i heave, figur b viser modellens respons i heave ved $H_s = 0,02$ Frekvens 0,2 - 2



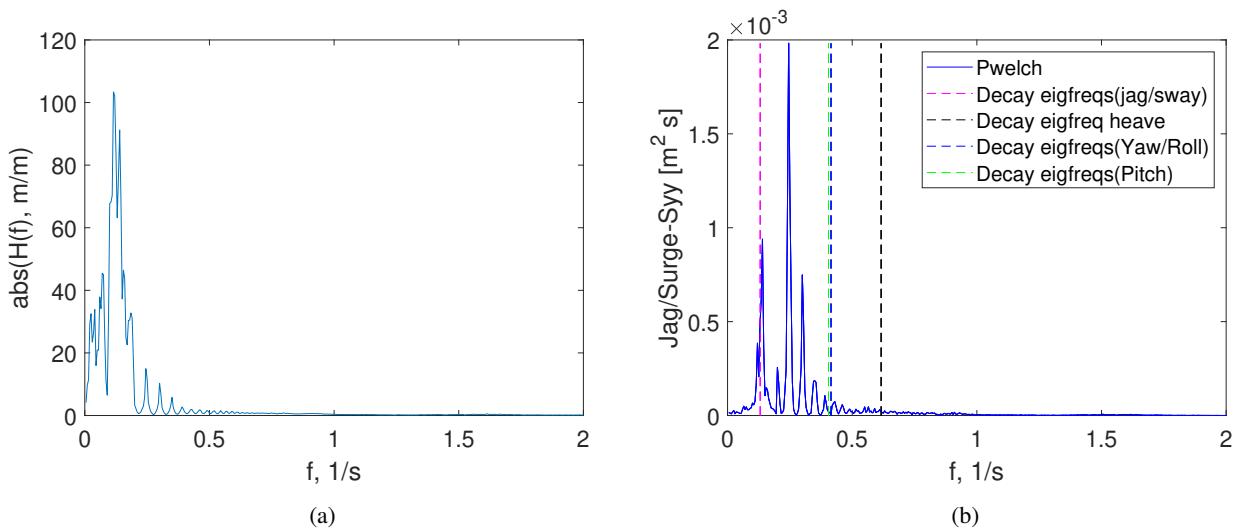
Figur 115: Figur a viser modellens RAO i yaw, figur b viser modellens respons i yaw ved $H_s = 0,02$ Frekvens 0,2 - 2



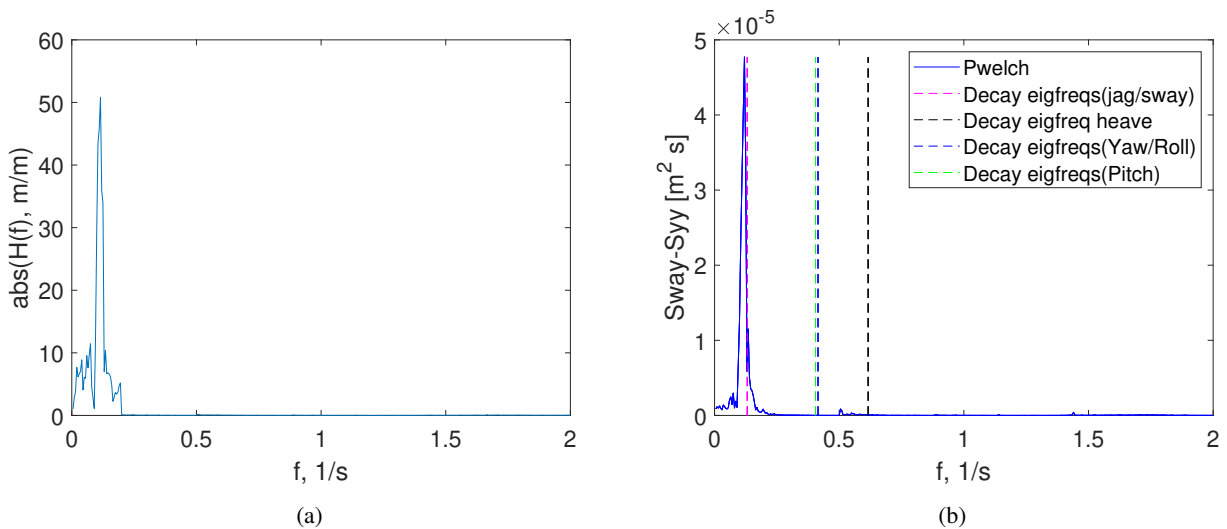
Figur 116: Figur a viser modellens RAO i pitch, figur b viser modellens respons i pitch ved $H_s = 0,02$ Frekvens 0,2 - 2



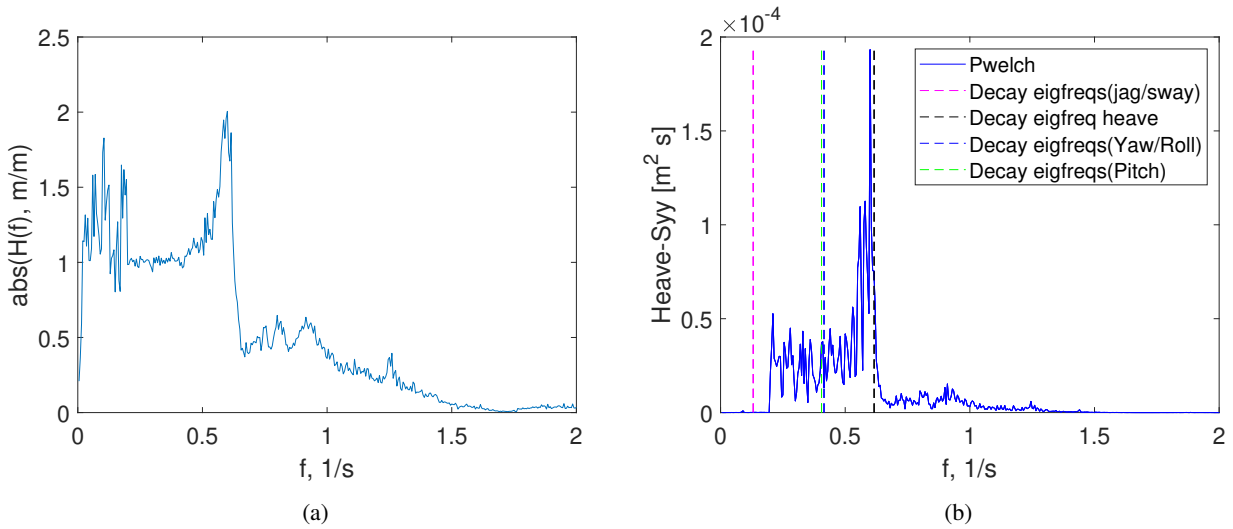
Figur 117: Figur a viser modellens RAO i roll, figur b viser modellens respons i roll ved $H_s = 0,02$ Frekvens 0,2 - 2



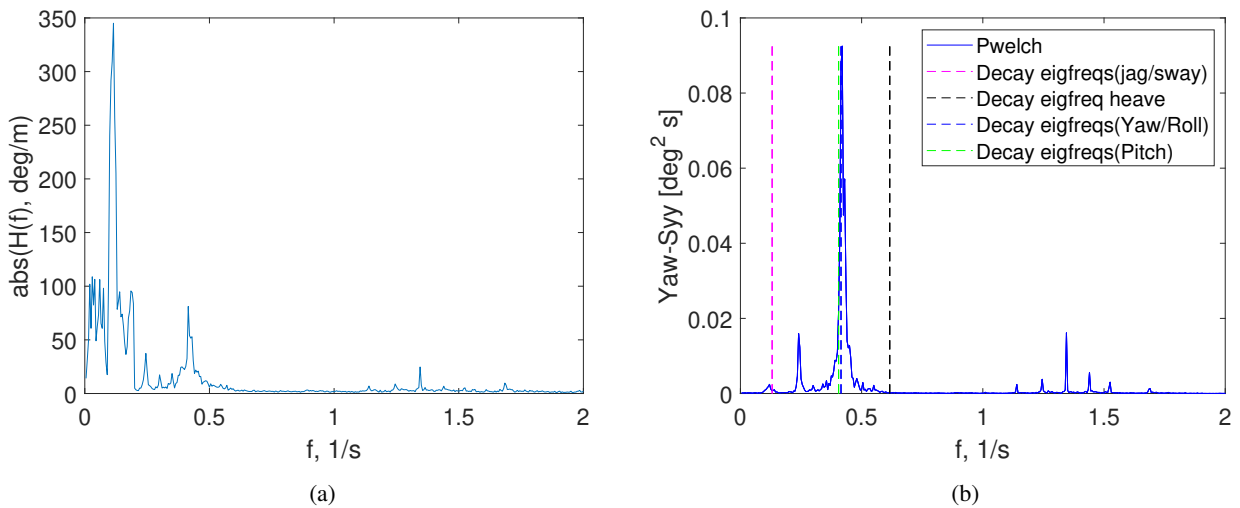
Figur 118: Figur a viser modellens RAO i jag, figur b viser modellens respons i jag ved $H_s = 0,04$ Frekvens 0,2 - 2



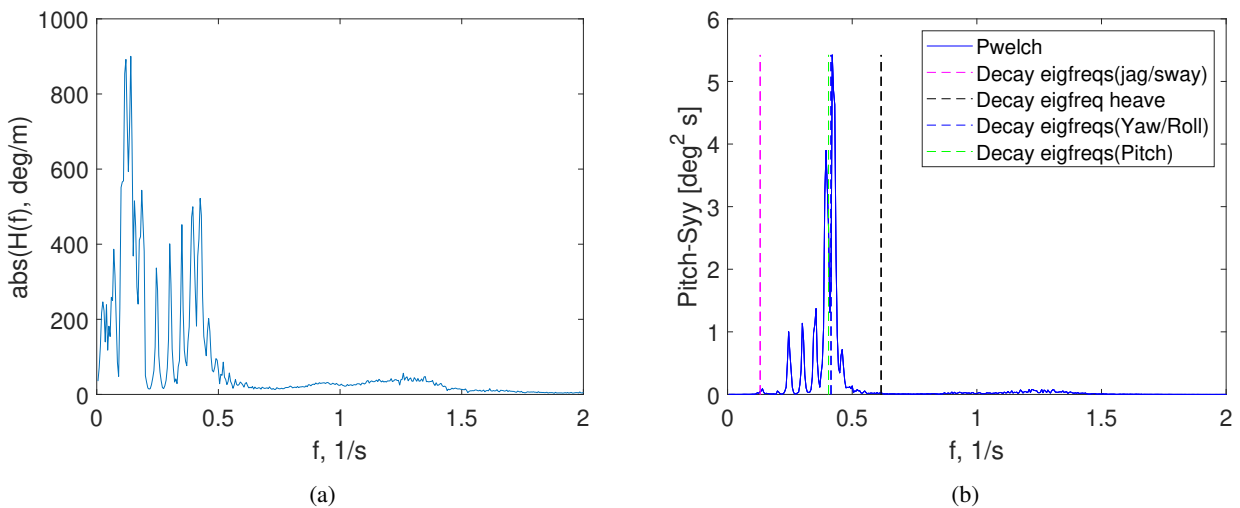
Figur 119: Figur a viser modellens RAO i sway, figur b viser modellens respons i sway ved $H_s = 0,04$ Frekvens 0,2 - 2



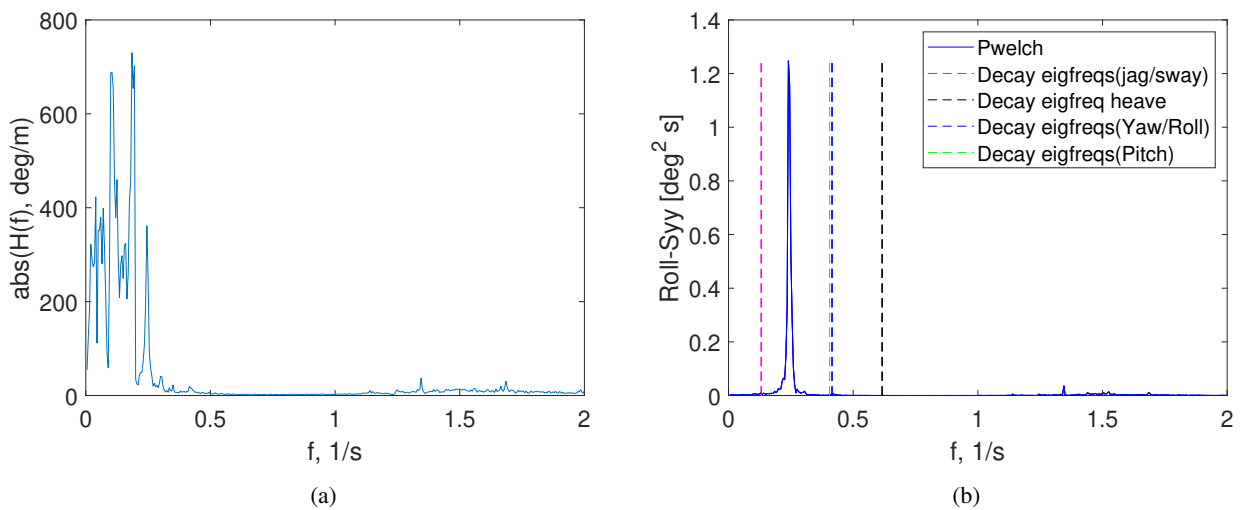
Figur 120: Figur a viser modellens RAO i heave, figur b viser modellens respons i heave ved $H_s = 0,04$ Frekvens 0,2 - 2



Figur 121: Figur a viser modellens RAO i yaw, figur b viser modellens respons i yaw ved $H_s = 0,04$ Frekvens 0,2 - 2

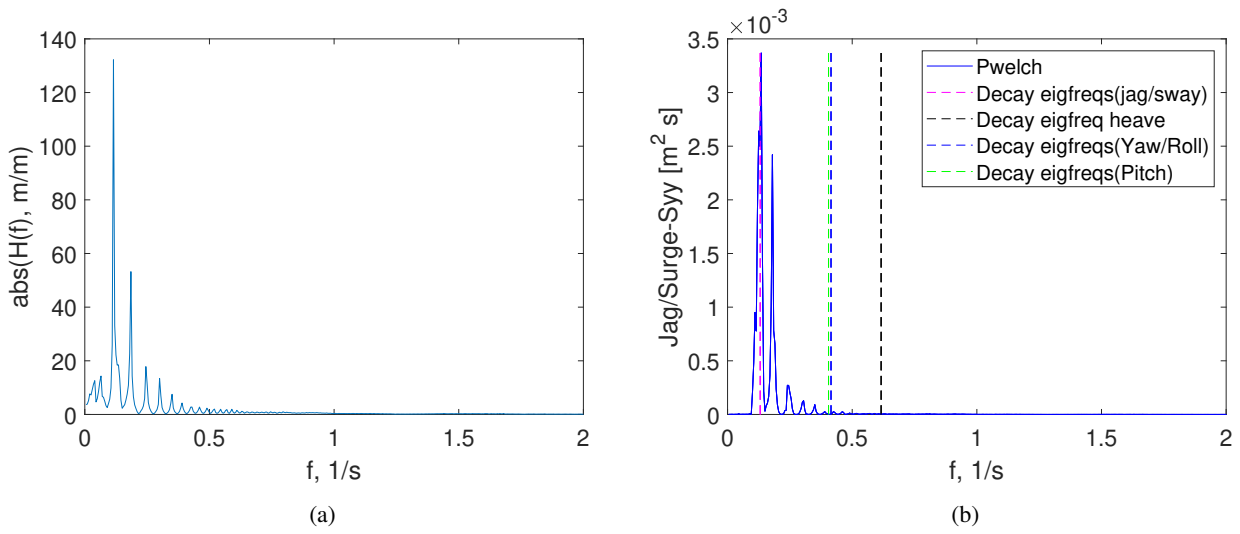


Figur 122: Figur a viser modellens RAO i pitch, figur b viser modellens respons i pitch ved $H_s = 0,04$ Frekvens 0,2 - 2

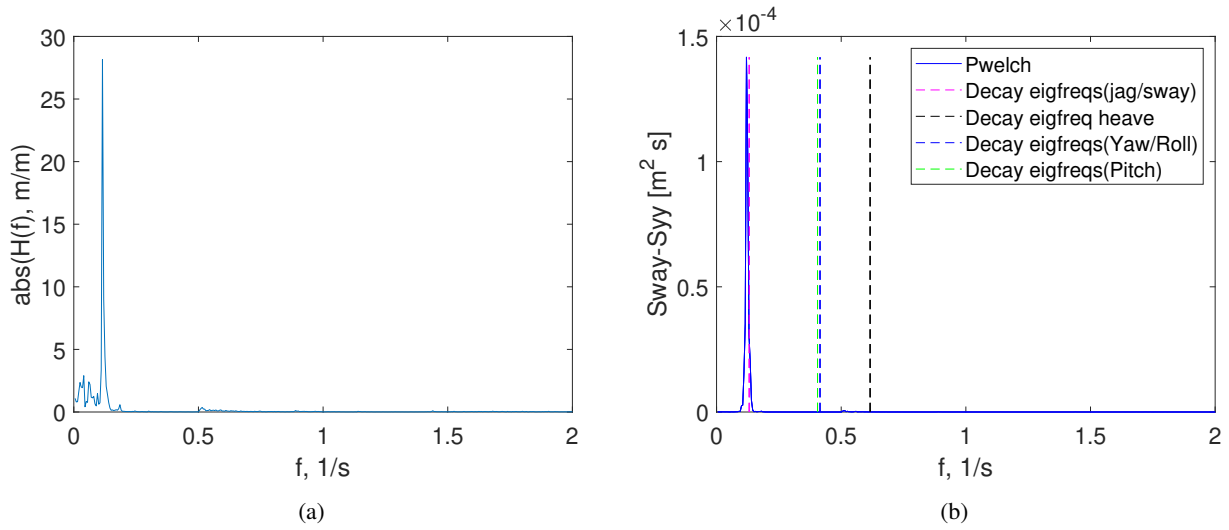


Figur 123: Figur a viser modellens RAO i roll, figur b viser modellens respons i roll ved $H_s = 0,04$ Frekvens 0,2 - 2

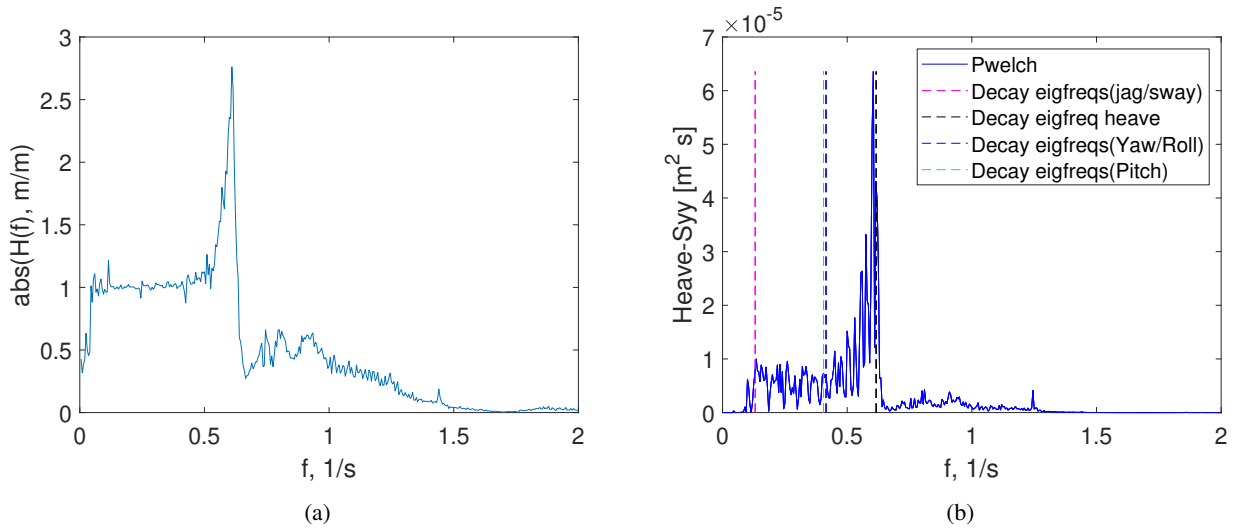
.04 hvit støy 180 grader



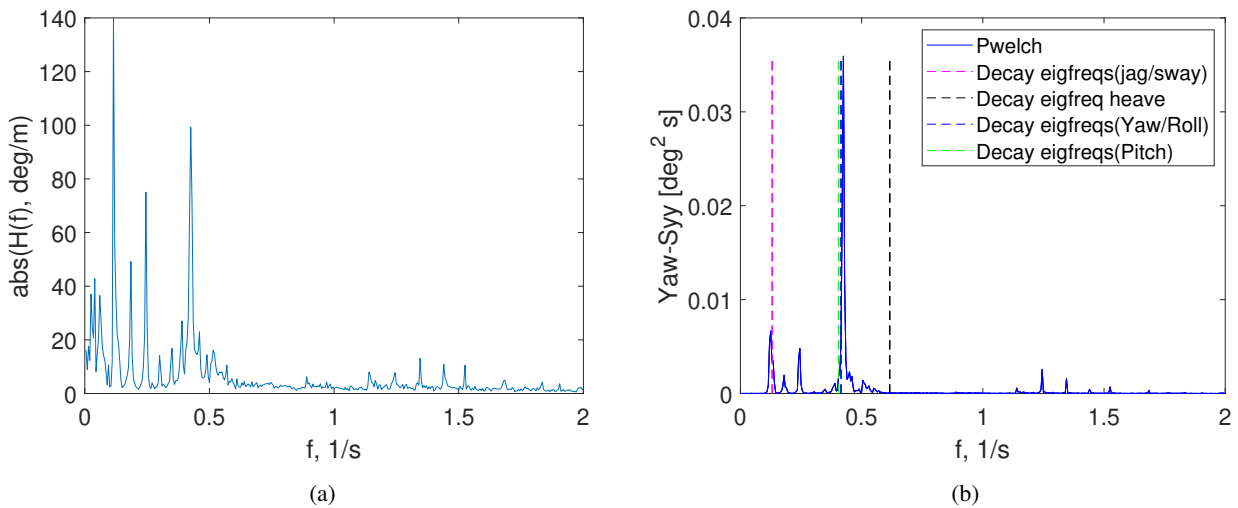
Figur 124: Figur a viser modellens RAO i jag, figur b viser modellens respons i jag ved $H_s = 0,02$ frekvens 0,05 - 2



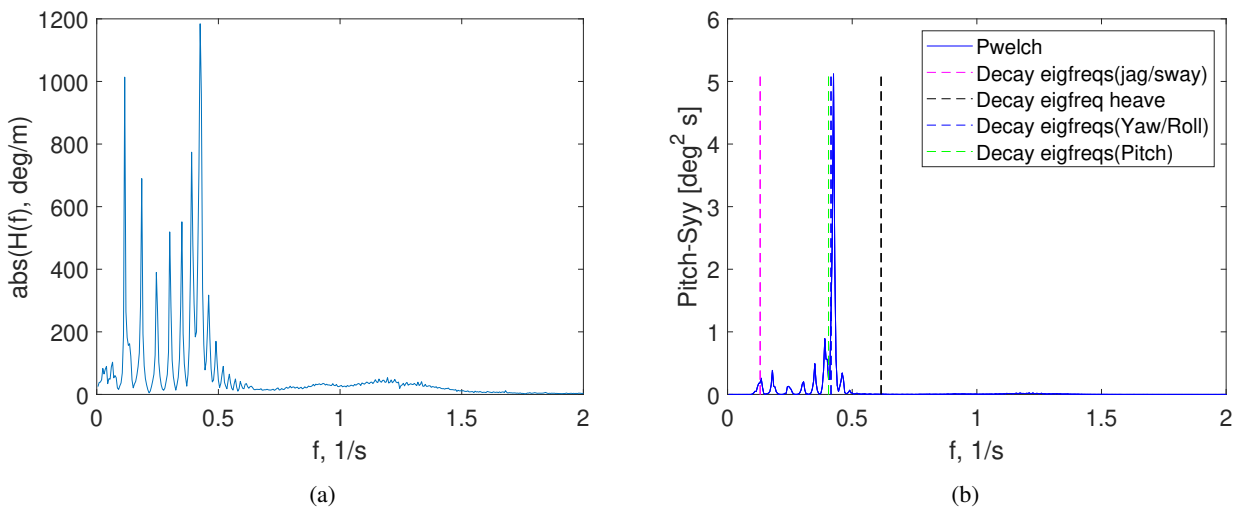
Figur 125: Figur a viser modellens RAO i sway, figur b viser modellens respons i sway ved $H_s = 0,02$ frekvens 0,05 - 2



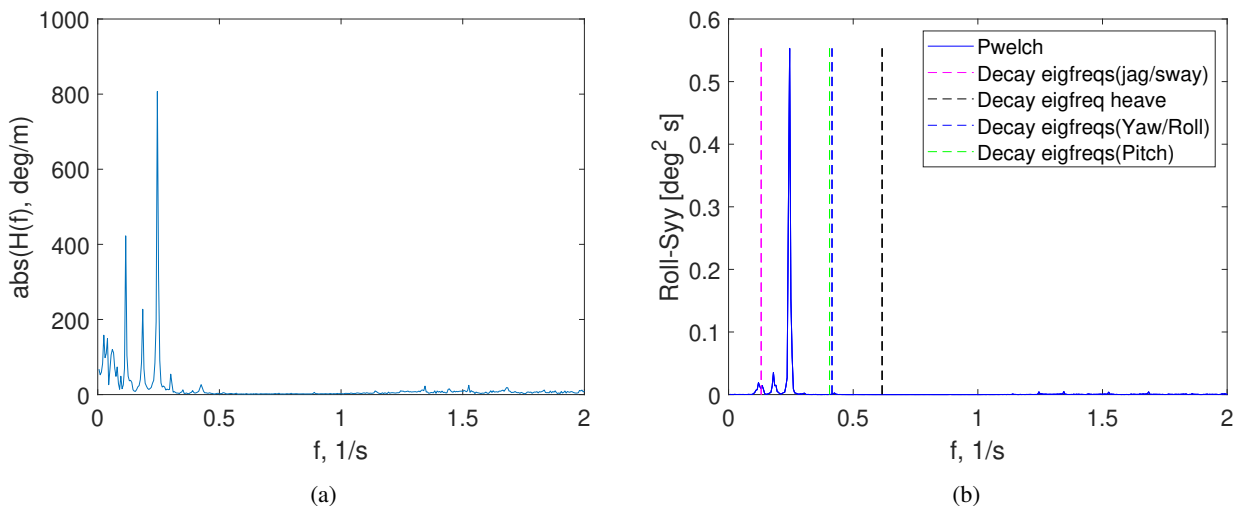
Figur 126: Figur a viser modellens RAO i heave, figur b viser modellens respons i heave ved $H_s = 0,02$ frekvens 0,05 - 2



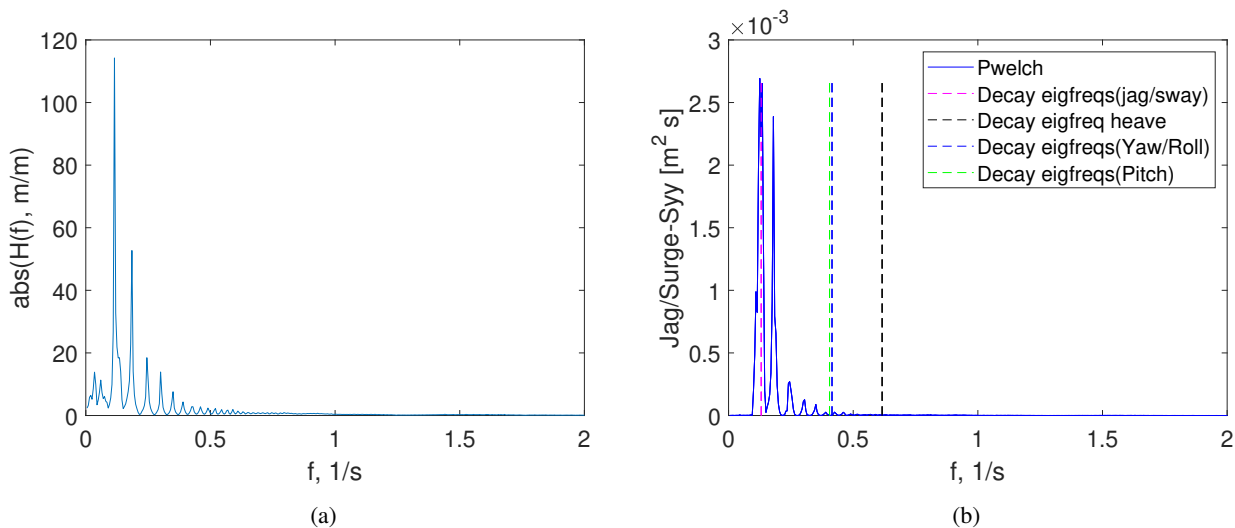
Figur 127: Figur a viser modellens RAO i yaw, figur b viser modellens respons i yaw ved $H_s = 0,02$ frekvens 0,05 - 2



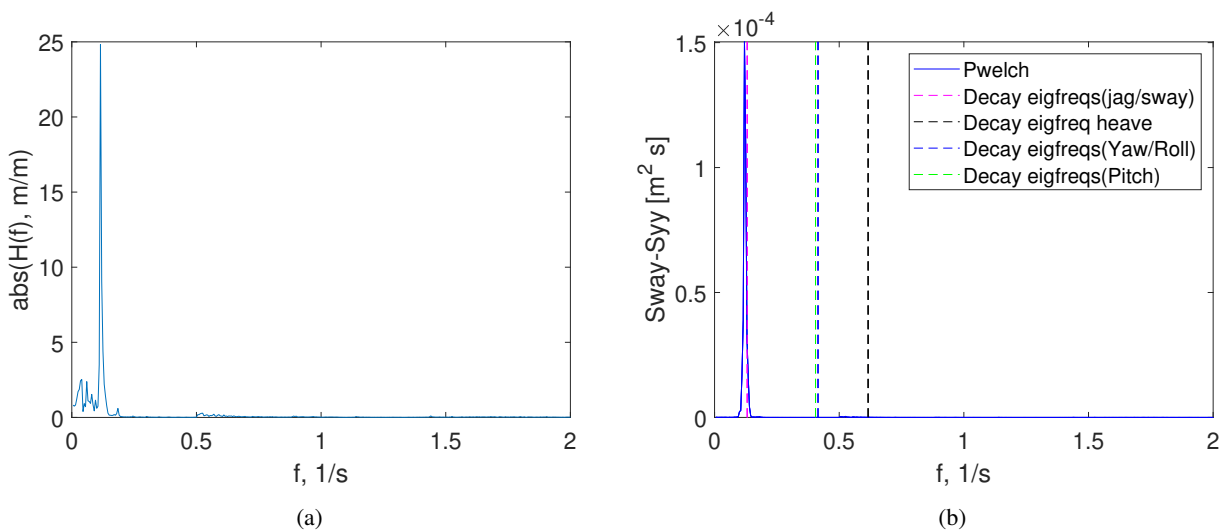
Figur 128: Figur a viser modellens RAO i pitch, figur b viser modellens respons i pitch ved $H_s = 0,02$ frekvens 0,05 - 2



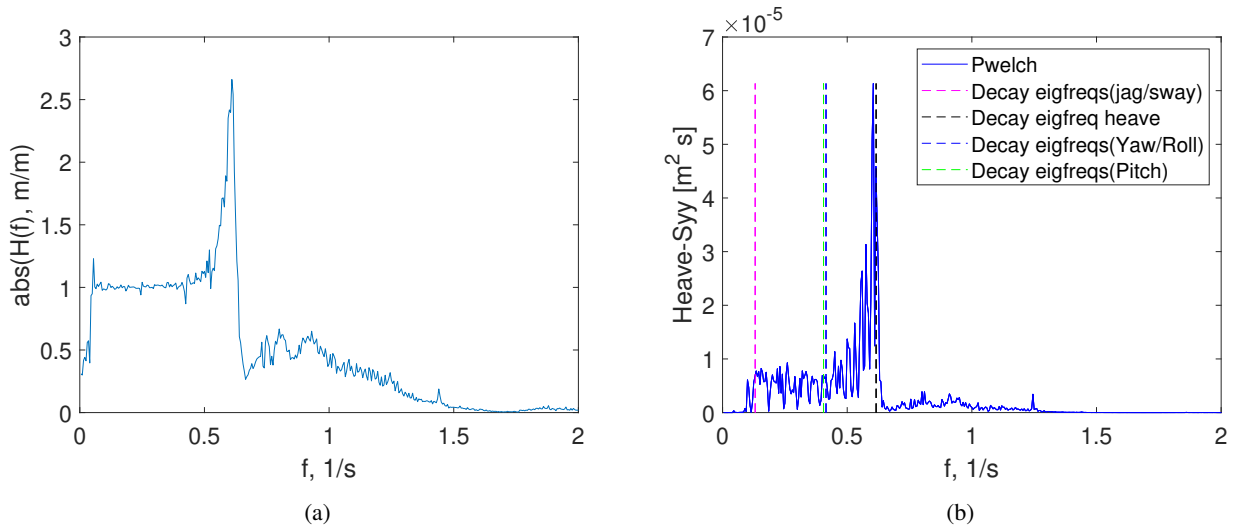
Figur 129: Figur a viser modellens RAO i roll, figur b viser modellens respons i roll ved $H_s = 0,02$ frekvens 0,05 - 2



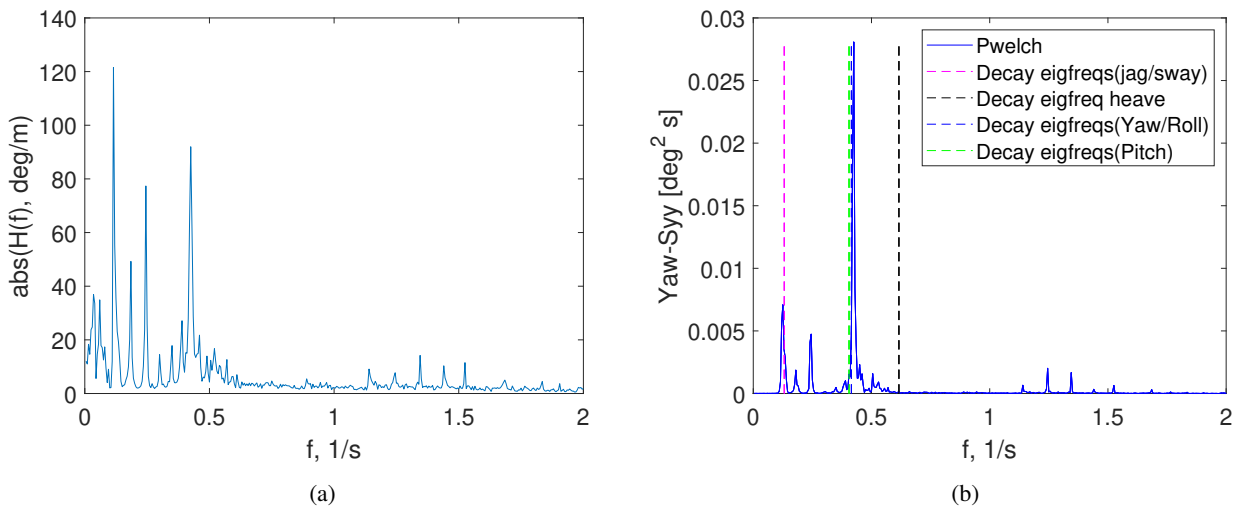
Figur 130: Figur a viser modellens RAO i jag, figur b viser modellens respons i jag ved $H_s = 0,02$ frekvens 0,2 - 2



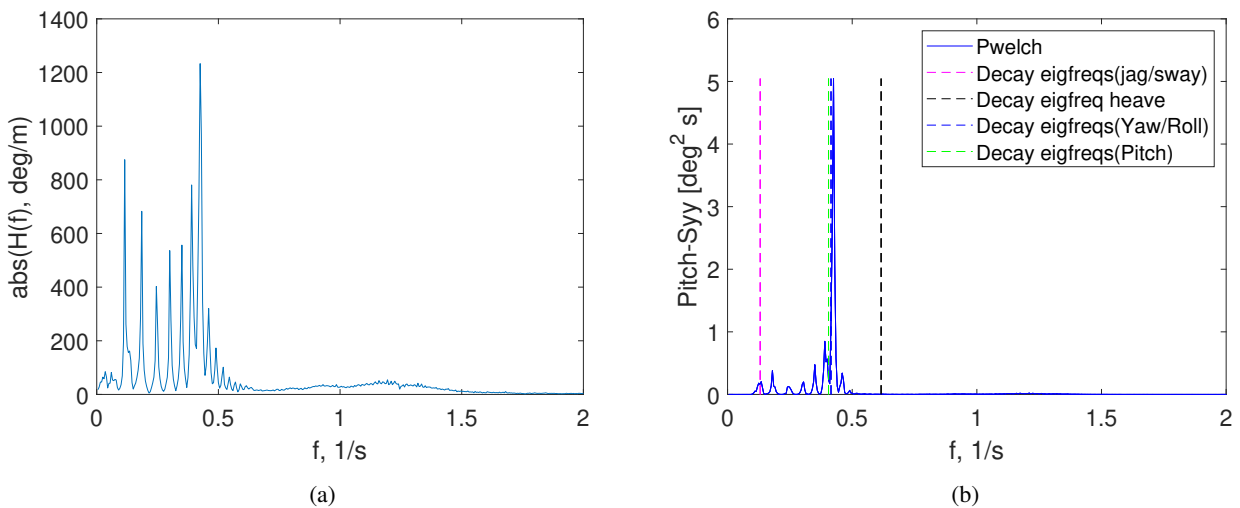
Figur 131: Figur a viser modellens RAO i sway, figur b viser modellens respons i sway ved $H_s = 0,02$ frekvens 0,2 - 2



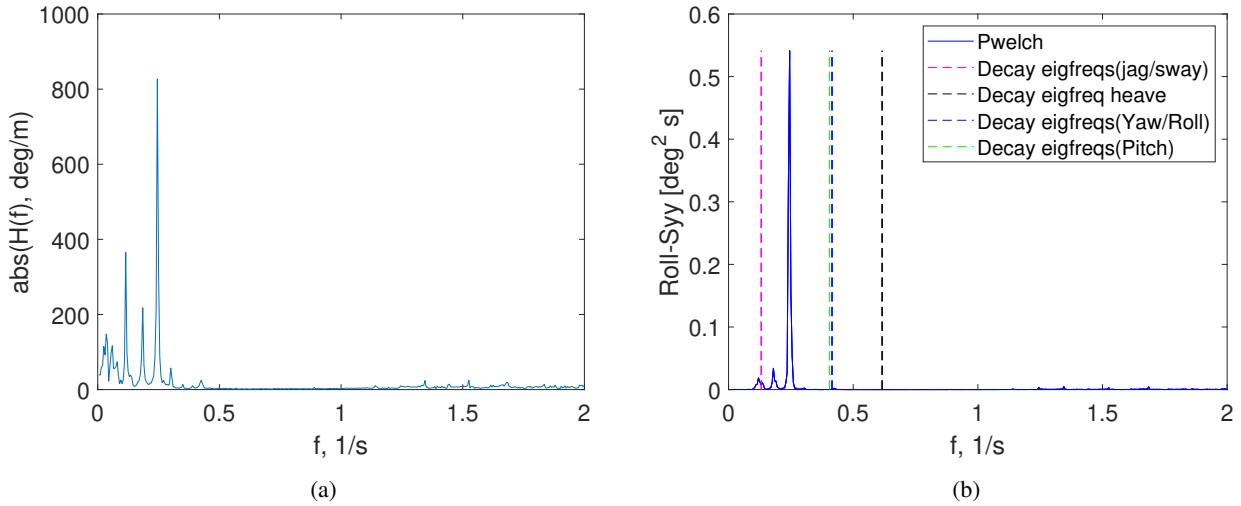
Figur 132: Figur a viser modellens RAO i heave, figur b viser modellens respons i heave ved $H_s = 0,02$ frekvens 0,2 - 2



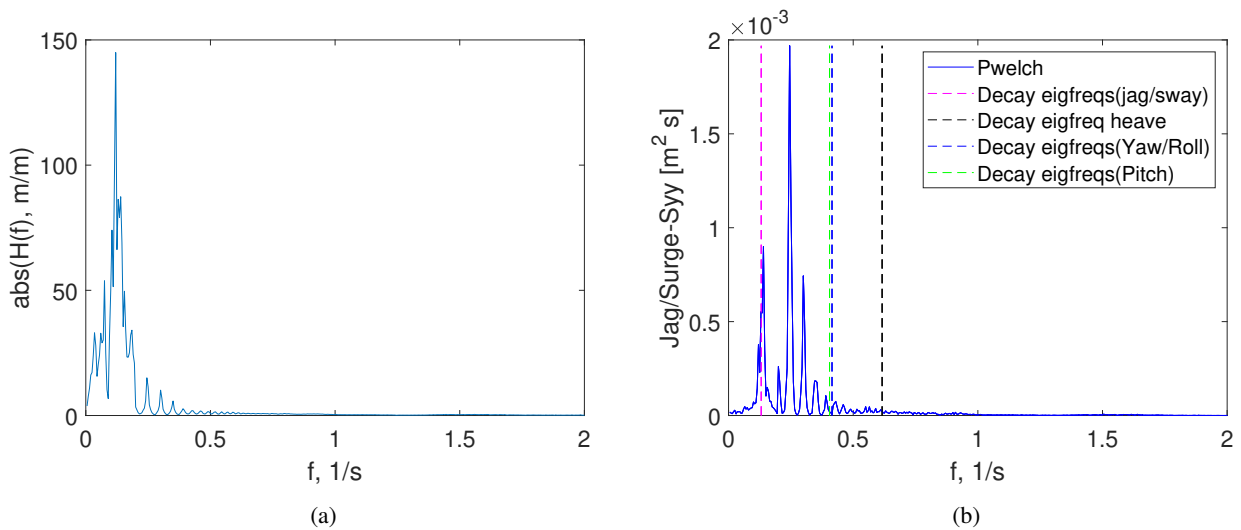
Figur 133: Figur a viser modellens RAO i yaw, figur b viser modellens respons i yaw ved $H_s = 0,02$ frekvens 0,2 - 2



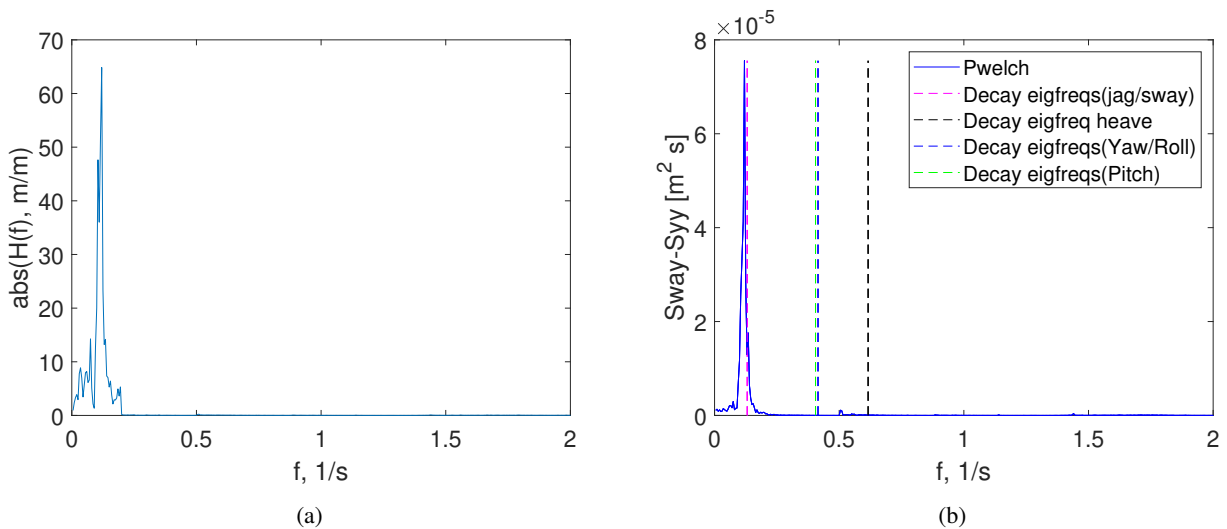
Figur 134: Figur a viser modellens RAO i pitch, figur b viser modellens respons i pitch ved $H_s = 0,02$ frekvens 0,2 - 2



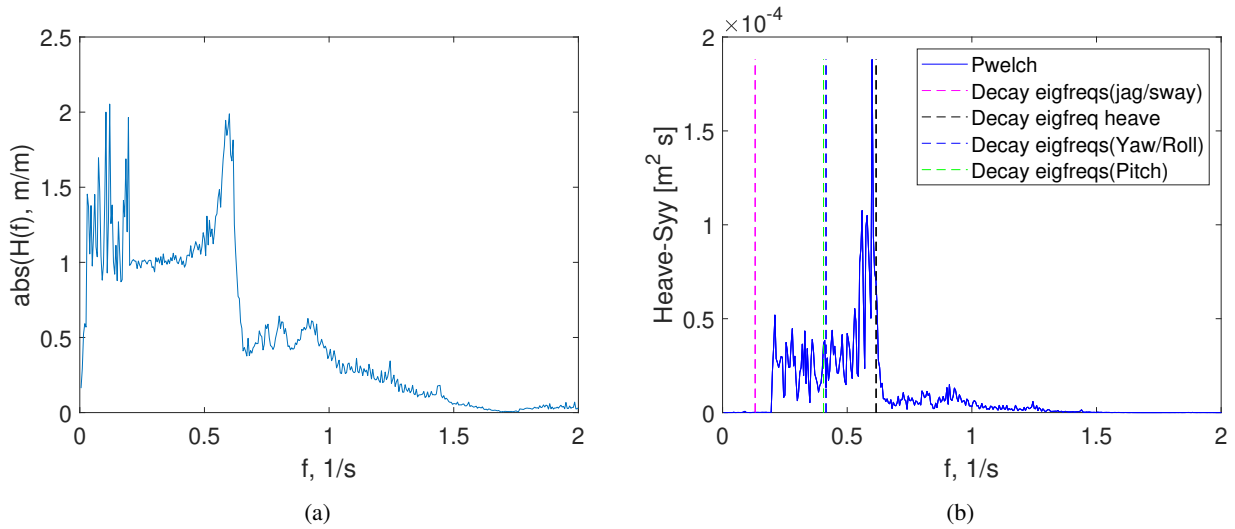
Figur 135: Figur a viser modellens RAO i roll, figur b viser modellens respons i roll ved $H_s = 0,02$ frekvens 0,2 - 2



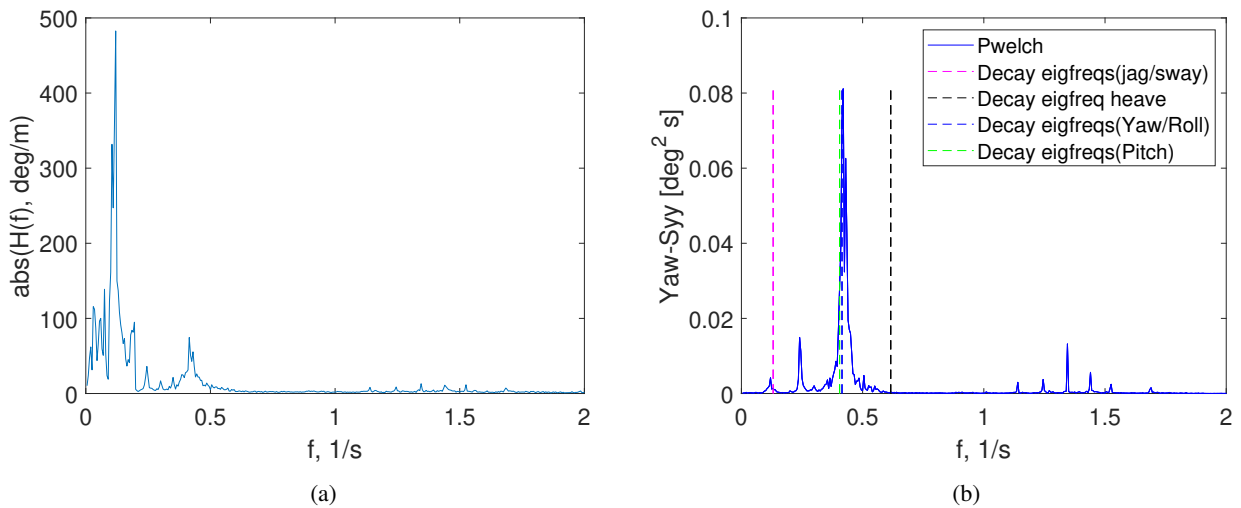
Figur 136: Figur a viser modellens RAO i jag, figur b viser modellens respons i jag ved $H_s = 0,04$ frekvens 0,2 - 2



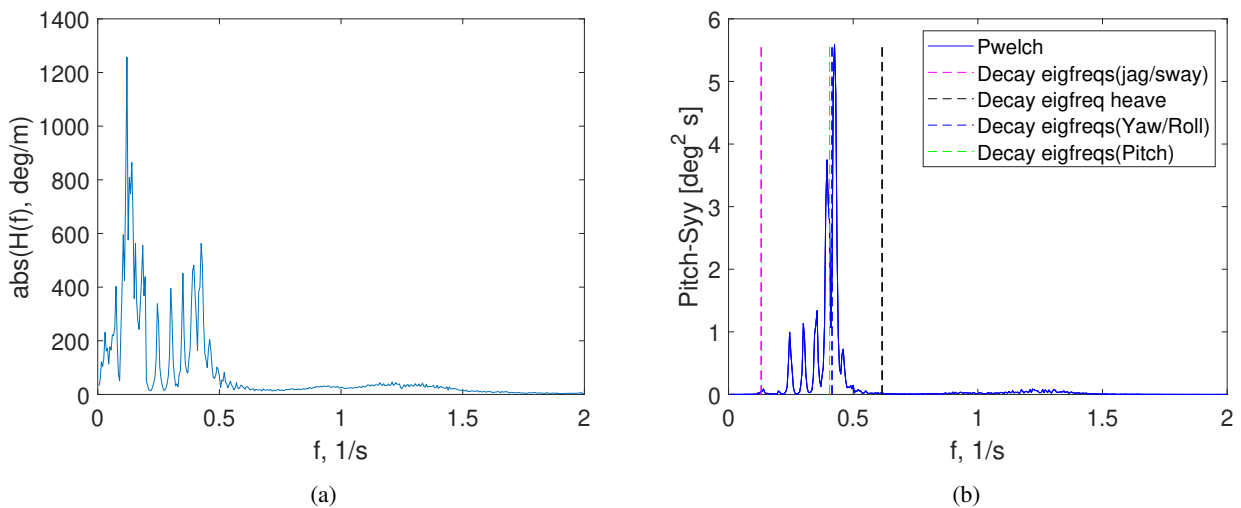
Figur 137: Figur a viser modellens RAO i sway, figur b viser modellens respons i sway ved $H_s = 0,04$ frekvens 0,2 - 2



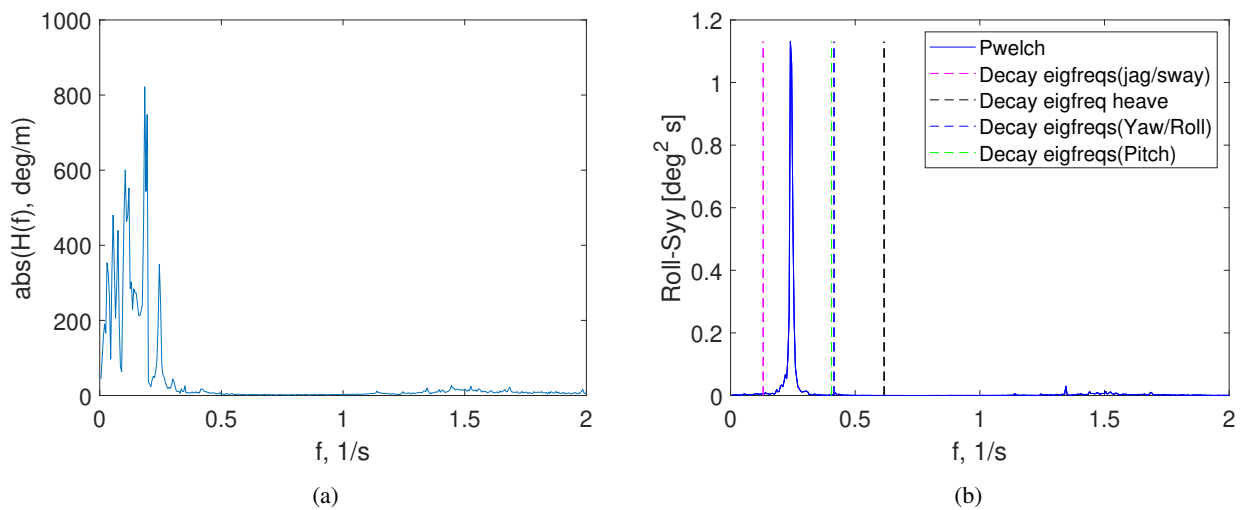
Figur 138: Figur a viser modellens RAO i heave, figur b viser modellens respons i heave ved $H_s = 0,04$ frekvens 0,2 - 2



Figur 139: Figur a viser modellens RAO i yaw, figur b viser modellens respons i yaw ved $H_s = 0,04$ frekvens 0,2 - 2



Figur 140: Figur a viser modellens RAO i pitch, figur b viser modellens respons i pitch ved $H_s = 0,04$ frekvens 0,2 - 2



Figur 141: Figur a viser modellens RAO i roll, figur b viser modellens respons i roll ved $H_s = 0,04$ frekvens 0,2 - 2

