

2018:00191 - Unrestricted

Rapport

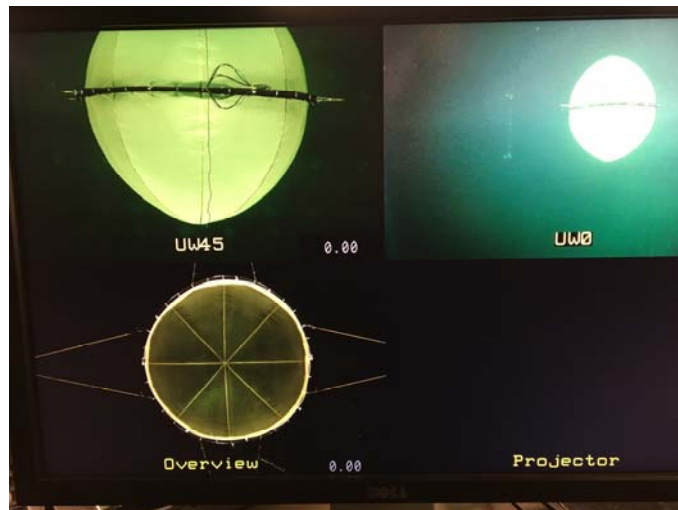
SJØFLO

Sjøegenskaper og forankring til flytende lukkede oppdrettsanlegg

Forfatter(e)

David Kristiansen

Per Christian Endresen, Pål Lader, Biao Su, Zsolt Volent, Vegard Aksnes.



SINTEF Ocean AS

Postadresse:
Postboks 4762 Torgarden
7465 Trondheim

Sentralbord: 464 15 000

ocean@sintef.no
www.sintef.no/ocean
Foretaksregister:
NO 937 357 370 MVA

Sluttrapport

SJØFLO

Sjøegenskaper og forankring til flytende lukkede oppdrettsanlegg

RAPPORTNR	PROSJEKTNR	VERSJON	DATO
2018:00191	302002595	1.0	2018-02-15

EMNEORD:Lukket merd, havbruk
sjøegenskaper,
fortøyning, sloshing,
hydrodynamikk,
modellforsøk.**FORFATTER(E)**David Kristiansen
Per Christian Endresen, Pål Lader, Biao Su, Zsolt Volent, Vegard Aksnes.**OPPDRAGSGIVER(E)**

FHF

OPPDRAGSGIVERS REF.

Kjell Maroni

ANTALL SIDER OG VEDLEGG:

43 + vedlegg

GRADERING

Unrestricted

GRADERING DENNE SIDE

Unrestricted

ISBN**SAMMENDRAG**

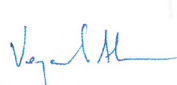
Denne rapporten omhandler sjøegenskaper og fortøyning til flytende lukkede merder i sjø gjennom dokumentasjon av skalerte modellforsøk og numeriske beregninger. En kategorisering av lukkede merder fra et hydrodynamisk perspektiv ble definert. Resultater fra skalerte modellforsøk og numeriske beregninger viser at resonante bevegelser av indre vannvolum (sloshing) har stor innflytelse på bølgeinduserte bevegelser til lukkede merder, og har dermed også stor påvirkning på fortøyningskreftene. Spesielt ble indre vannvolum observert å gi en forsterkning av bevegelser i jag for bølgeperioder som kan være relevant for fjordlokaliteter. Ulike generiske modeller ble testet, med forskjellig geometri og strukturelle elastiske egenskaper. Lignende hovedtrender ble observert for bølgeinduserte bevegelser til alle modellene. Drenering av en fleksibel posemerd på grunn av tetthetsforskjell mellom indre vannvolum og omgivelser, ble studert ved skalerte modellforsøk og numeriske simuleringer. Forslag til tidlig deteksjon av lekkasje kan være å overvåke internt vannnivå i merden, da lekkasje fører til rask reduksjon av vann-nivå initielt.

**UTARBEIDET AV**

David Kristiansen

**KONTROLLERT AV**

Vegard Aksnes

**GODKJENT AV**

Hanne Digre, Forskningsjef

Digitally signed by
Aksnes Vegard
Øgård
Date: 2018.02.15
12:57:27 +01'00'

Historikk

VERSJON	DATO	VERSJONSBESKRIVELSE
1.0	2018-02-15	Første versjon

Innholdsfortegnelse

1	Innledning	5
1.1	Prosjektorganisering	6
1.1.1	Prosjekteier	6
1.1.2	Prosjektgruppe	6
1.1.3	Styringsgruppe	7
1.2	Problemstilling og formål	7
2	Gjennomføring	7
2.1	Valg av forskningsmetode	7
2.2	Arbeidsmøte 1 i forbindelse med forsøk – Mars 2017	8
2.3	Arbeidsmøte 2 i forbindelse med forsøk – Desember 2017	8
2.4	Kommunikasjon og disseminering	8
3	Kategorisering av lukket merd	9
3.1	Parametere for karakterisering av lukket merd	9
3.2	Hovedkategorier av lukket merd	10
4	Skalerte modellforsøk med lukket merd	10
4.1	Modeller	10
4.2	Fortøyningsoppsett	11
4.3	Instrumentering	12
4.4	Innsvingningsforsøk	13
4.5	Testkondisjoner	16
5	Sjøegenskaper	18
5.1	Stabilitet	18
5.2	Bølgeinduserte bevegelser	20
5.2.1	Stiv grunn modell	20
5.2.2	Stiv dyp modell	25
5.2.3	Elastisk modell	27
5.2.4	Fleksibel posemerd	29
5.2.5	Bølgerefleksjon fra tankvegg ved modellforsøk	31
5.2.6	Radiasjonskrefter (tilleggsmasse og demping)	31
5.3	Fortøyningskrefter	32
5.3.1	Førsteordens bevegelser	32
5.3.2	Midlere bølgedriftskrefter	32
5.3.3	Saktevarierende krefter og bevegelser	33
5.4	Sloshing	34
5.5	Elastiske deformasjoner	37

6	Effekt av tetthetsforskjell ved skade.....	38
6.1	Tetthetsforskjeller.....	38
6.2	Drenering av posemerd	39
7	Konklusjon	42
8	Referanseliste	42
9	Hovedfunn	43
10	Leveranser.....	43

BILAG/VEDLEGG

[Skriv inn ønsket bilag/vedlegg]

Summary

This report deals with seakeeping behavior and moorings of generic sea-based closed fish cage structures through documentation of scaled model tests and numerical simulations. A categorization of closed cage concepts from a hydrodynamic and structural perspective is defined. Results from scaled model tests and numerical calculations show that resonant liquid motions of the contained water (sloshing) has large influence on the wave-induced motions of the closed cage, and hence also influences the mooring loads. In particular, large amplification of the surge motion was observed for wave periods that can be relevant for fjord locations. Different generic models were considered, with different geometry and structural elastic properties. Similar main trends of the wave induced motions were observed for the different models. Drainage of a closed flexible bag structure due to differences in water density between the contained water and the surroundings combined with a hole in the bag, was studied by means of scaled model tests and numerical simulations. Early detection of leakage is suggested by monitoring the internal water level, as inception of leakage cause a rapid decrease of the internal water level, initially.

1 Innledning

Prosjektet SJØFLO er motivert av økende interesse for lukket merd i sjø hos oppdrettsnæringa, kombinert med et behov for økt kunnskap om fysiske egenskaper til lukkede merder i sjø for å redusere risiko for havari. Årsaken til denne økende interessen hos næringen skyldes hovedsakelig kampen mot lakselus og ønsket om å få bedre kontroll på produksjonen. Mulig tilgang til nye lisenser for produksjon av laks gjennom såkalte utviklingstillatelser har også vært en viktig stimulator til utvikling av nye lukkede merdsystemer. Flere tilfeller har blitt rapportert i media hvor prototyper av lukkede merder har havarert i dårlig vær.

Begrepene *lukket merd* og *semi-lukket merd* brukes ofte for å karakterisere lukkede merder, men begrepet har forskjellig betydning i ulike fagmiljøer. Én definisjon som brukes i sammenheng med biologi (fiskehelse og vannkjemi) er at semi-lukket merd ikke har rensing av innløpsvann, mens lukket merd har rensing av innløpsvann. Rosten et al. (2011) definerte fire hovedkategorier for lukkede merder i sjø fra et biologisk perspektiv og fokus på vannkvalitet. Fra et hydrodynamisk perspektiv er en lukket merd en konstruksjon hvor vannvolumet inne i merda er fysisk adskilt fra omgivelsene med tette skott, uten betraktning av systemer for vannutskiftning. Tilsvarende er semi-lukket merd fra et hydrodynamisk perspektiv en konstruksjon hvor bare deler av tankvolumet er begrenset med tette skott, slik at f.eks. bunnen kan være åpen (dvs. avstengt av not).

Lukkede merder i sjø har i dag et merdvolum på opptil 21000 m³, noe som er nok til å ta 200 000 stk fisk opp til slaktestørrelse med dagens krav til fisketetthet. Det er som regel behov for tilsetning av oksygen når man når en viss biomasse i et lukket merdsystem. Utskiftning eller rensing av vann er også nødvendig for å fjerne CO₂ og andre avfallsstoffer. Dette betyr at lukkede merder må ha et system for vannutskiftning og fjerning av slam/avfallsstoffer. Indre vannvolum er ofte strømsatt med hastigheter opp mot 40 cm/s, avhengig av fiskens størrelse.

Motivasjon for prosjektet er økt fokus på rømmingssikring for lukkede anlegg kombinert med høy innovasjonstakt i oppdrettsnæringa med utvikling av nye konsepter for lukkede merder i sjø. Det er behov for mer kunnskap om sjøegenskaper og fortøyning til lukkede merder for å redusere risiko for svikt i dårlig vær.

1.1 Prosjektorganisering

1.1.1 Prosjekteier

Ved oppstartstidspunktet var prosjektet et samarbeidsprosjekt mellom daværende SINTEF Fiskeri og havbruk (SFH) og MARINTEK, som begge var datterselskap i SINTEF-gruppen. Fra 1. januar 2017 ble disse to instituttene fusjonert til nåværende SINTEF Ocean. Prosjektet ble dermed fra 1. januar 2017 underlagt én juridisk enhet.

1.1.2 Prosjektgruppe

Ved oppstart av prosjektet var prosjektgruppen organisert som følger

- Prosjektleder (SFH): David Kristiansen
- Prosjektleder (MARINTEK): Vegard Aksnes
- Medarbeidere: Pål Lader, Biao Su, Zsolt Volent, Per Christian Endresen, Maxime Thys.
- Kvalitetssikrer: Trond Rosten

Etter fusjonen mellom MARINTEK og SFH, overtok David Kristiansen rollen som prosjektleder for hele prosjektet. Videre overtok Vegard Aksnes rollen som kvalitetssikrer i prosjektet, etter at Trond Rosten sluttet i SINTEF høsten 2017.

1.1.3 Styringsgruppe

En styringsgruppe til prosjektet ble utpekt av FHF og besto av følgende personer

- Ragnar Joensen, Marine Harvest
- Olai Einen, Cermaq
- Arnfinn Torgnes, Norsk Havbrukssenter

Fra høsten 2017 overtok Trond Rosten som representant i styringsgruppen for Marine Harvest.

1.2 Problemstilling og formål

Dette prosjektet har som hensikt å belyse noen hovedutfordringer knyttet til hydrodynamikk ved utvikling av lukkede merder i sjø. Det fokuseres på generelle problemstillinger og generiske konstruksjonstyper. Økt kunnskap om oppførsel til lukkede merder i sjø er viktig for å redusere risiko for konstruksjonssvikt og havari, med påfølgende mulighet for rømming av fisk.

Prosjektets hovedmål:

Å muliggjøre utvikling av sikre konstruksjoner for lukkede fiskeoppdrett i sjø, ved å øke forståelsen for bølge- og strømbelastninger hos forskningsmiljø og oppdrettere, samt å foreslå retningslinjer for designmetodikk for slike anlegg.

Hovedmålet skal nås ved å realisere følgende delmål:

- DM1: Prosjektet skal kartlegge og klassifisere de konseptene man kjenner for flytende lukket oppdrett per i dag, basert på hydrodynamiske og konstruksjonstekniske egenskaper.
- DM2: Prosjektet skal bidra til økt kunnskap om bølgekrefter på lukkede anlegg, økt forståelse av dynamisk respons, betydning for forankringssystem, samt retningslinjer for design.
- DM3: Prosjektet skal undersøke trykk- og tetthetsforskjeller i operative og skadede tilstander og hvilke krefter dette påfører lukkede anlegg.
- DM4: Prosjektet skal øke kompetanse om oppførsel til storvolum havbrukskonstruksjoner i bølger og strøm blant oppdrettere, så vel som hos forskningsinstituttene, gjennom eksperimentelt arbeid som inkluderer to arbeidsmøter.

2 Gjennomføring

2.1 Valg av forskningsmetode

To runder med skalerte modellforsøk ble gjennomført, hvor generiske modeller av flytende lukket merd ble testet i bølger. Begge forsøkene ble gjennomført i Skipsmodelltanken (Forlengelsen) ved SINTEF Ocean på Tyholt. Skalerte modellforsøk er en etablert forskningsmetode ved studier av hydrodynamisk oppførsel til marine konstruksjoner i bølger. To åpne arbeidsmøter ble arrangert i forbindelse med forsøkene, hvor deltakere fikk mulighet til å overvære testing av merdmodeller. Prosjektarbeidet baserte seg også på numerisk modellering og simulering av bølgerespons til lukkede merder, så vel som effekt av tetthetsforskjell av vann i merden i relativ til omgivelser. I tilknytning til dett ble det også gjennomført enkle modellforsøk med drenering av posemerd i et sjøvannskar ved SINTEF SeaLab. Bruk av numeriske verktøy kombinert med modellforsøk er egnet til å øke forståelsen av fysisk oppførsel til marine konstruksjoner sjø, da numeriske simuleringer og modellforsøk ofte er komplementerende metoder.

2.2 Arbeidsmøte 1 i forbindelse med forsøk – Mars 2017

Første arbeidsmøte ble gjennomført ved SINTEF Ocean sine lokaler på Tyholt den 17. mars 2017 med 24 deltakere. Fem innledere holdt korte presentasjoner med ulike perspektiver knyttet til lukket merd i sjø, som innledning til diskusjon. Disse var:

- Håkon Andersen, Dr. Techn. Olav Olsen
- Pål A. Fossan, Fiskeridirektoratet
- Vegard Aksnes, SINTEF Ocean
- Ida Strand, NTNU
- Mona Tofte, NTNU

Som del av arrangementet ble deltakerne delt inn i grupper med besøk i laboratoriet for å se på forsøk. Test av elastisk merdmodell i irregulær sjø ble demonstrert, og deltakerne kunne observere overskylling av vann og store elastiske deformasjoner av merdmodell ved en relativt beskjeden sjøtilstand ($H_s=1,5$ m, $T_p = 4,7$ s).

2.3 Arbeidsmøte 2 i forbindelse med forsøk – Desember 2017

Andre arbeidsmøte gikk av stabelen den 4. desember 2017 ved SINTEF Ocean sine lokaler på Tyholt. Møtet hadde 39 deltakere. Korte presentasjoner ble holdt av følgende innledere:

- Arnfinn Torgnes, Norsk Havbrukssenter
- Åsa Espmark, NOFIMA/CtrlAqua
- Pål Fossan, Fiskeridirektoratet
- Heidi Moe Føre, SINTEF Ocean
- David Kristiansen, SINTEF Ocean
- Reza Firoozkoohi, SINTEF Ocean
- Vegard Aksnes, SINTEF Ocean

Ved besøk i laboratoriet fikk deltakerne observere test med modell av fleksibel posemerd i irregulær sjø. Tilfeller med overskylling av vann inn i merda ble observert.

2.4 Kommunikasjon og disseminering

Framdriften i prosjektet ble rapportert til styringsgruppens medlemmer gjennom månedlige oppdateringer per epost.

Ekstern formidling fra prosjektet ble i tillegg til arbeidsmøtene gjennomført ved:

- Presentasjon med orientering om prosjektet på TEKMAR 2016.
- Presentasjon på TEKSET 2017 om kategorisering av lukket merd.
- Presentasjon av prosjekresultater på Arbeidsmøte 1 i forbindelse med forsøk den 17. mars 2017.
- Presentasjon av prosjekresultater under Aqua Nor ved SINTEF SeaLab den 17. august 2017.
- Presentasjon av prosjekresultater ved oppstart av KPN Closed Cages in Waves den 17.10.2017
- Presentasjon av prosjekresultater på Arbeidsmøte 2 i forbindelse med forsøk den 4.12.2017.
- Nyhetssak med intervju og video publisert på Intrafish den 12. desember 2017.
- Nyhetssak om prosjektet i GEMINI i januar 2018.
- Innsendt artikkel under vurdering for publisering i Journal of Fluids and Structures
- Radiointervju om lukkede merder på NRK P1 Trøndelag den 29. januar 2018.
- Innsendt artikkel under vurdering for presentasjon på konferansen OMAE2018 og publisering i Proceedings of OMAE2018.

3 Kategorisering av lukket merd

Det er en stor variasjon av konsepter for lukket merd i alt fra materialvalg til størrelse og geometrisk utforming. Materialvalg varierer fra fleksibel duk til helt stive betongkonstruksjoner. Formen av selve merdvolumet varierer også, men er ofte karakterisert ved en halvkule, sirkulærsylindrisk eller rektangulær tank. Noen få konsept bruker liggende sylindere (Preline konseptet). Forankring er stort sett tradisjonell, dvs. det skal brukes rammefortøyning slik som er vanlig i havbruk i Norge i dag. Svaiforankring er også foreslått for enkelte konsepter. Den store variasjonen i konsept med hensyn til utforming (geometri), men også med hensyn til materialvalg, gjør det nødvendig å kategorisere/skilte de forskjellige konseptene/prinsippene.

Table 1: Oversikt av materialer og design av lukkede merder

Materiale volum	Fiberarmert PVC duk, glassfiberarmert plastikk (GRP), stål, betong
Materiale flytekrage	GRP (kompositt), stål, betong
Geometrisk form	Kule, halvkule, vertikal sylinder (sirkulær, ti-kantet), horisontal sylinder, firkantet, horisontal torus (smultring)
Realisering av geometri	-Tradisjonelt oppsett av volum med vertikal sirkulær eller firkantet/mangekantet sylindrisk volum med flytekrage/flyteelementer med tradisjonell fortøyning. -GRP-/Betongflåter som flytekrage og innfesting -Flytekrager/innfesting i stål. Tradisjonelt volum -Stålkonstruksjon med flere merder, gjenbruk av bulkskip. -Betongmerder (sylindrisk og kvadratiske i form) -Stålmerd (sylindrisk) -Ikke-tradisjonelle design: Liggende sylindre, kule (oval), halvkule.
Fortøyning	Tradisjonelt oppsett i rammefortøyning, flåtebasert med dedikert fortøyning, fortøyd på svai
Fri overflate	Stort sett i alle konsept. Noen konsepter benytter seg av en redusert fri overflate i forhold til største horisontale tverrsnitt av karvolumet (f.eks. Egget til Hauge Aqua Solutions eller Preline til Lerøy).
Storvolum-konstruksjon	Stort sett alle konsept. Dette betyr at konstruksjonen påvirker innkommende bølgesystem, slik at man må ta hensyn til diffraksjonseffekter ved hydrodynamisk analyse.

3.1 Parametere for karakterisering av lukket merd

Relevante parametere for beskrivelse av en lukket merd er:

- Geometri/form
- Hoveddimensjoner L, B, D.
- Deplasement ∇
- Tankvolum Ω
- Areal av fri overflate A_{FS}
- Tankdybde h
- Elastisitet EA
- Bøyetivhet EI

- Stabilitet GM, GZ
- Egenperioder til sloshing Tn

Forslag til nyttige dimensjonsløse tall:

- $\frac{\Omega}{V}$ – beskriver vannvolum i forhold til totalt deplasement
- $\frac{A_{FS}}{A_{WL}}$ – beskriver areal av fri overflate i merd relativt til vannplanareal av hele konstruksjonen

3.2 Hovedkategorier av lukket merd

I dette prosjektet har man valgt å opprette tre hovedkategorier til lukkede merdsystem fra et hydrodynamisk perspektiv, basert på merdens fleksible egenskaper. Disse hovedkategoriene er:

- **Stiv merd** – vil ikke deformeres nevneverdig under relevante sjøbelastninger. Typiske konstruksjonsmaterialer er stål eller betong.
- **Elastisk merd** – vil ha merkbare elastiske deformasjoner under relevante sjøbelastninger. Typisk konstruksjonsmateriale er glassfiberarmert plast (GRP)
- **Fleksibel posemerd** – vil kunne ha store deformasjoner under relevante sjøbelastninger. Form og sjøegenskaper er avhengig av fyllingsgrad (presenningsduk)

Merdens fleksible egenskaper påvirker sjøegenskapene til merden. I hvor stor grad merden deformerer seg har også betydning for hvilke beregningsmetoder og numeriske verktøy som kan brukes.

4 Skalerte modellforsøk med lukket merd

4.1 Modeller

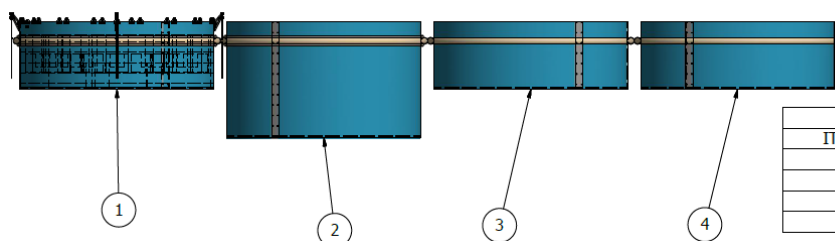
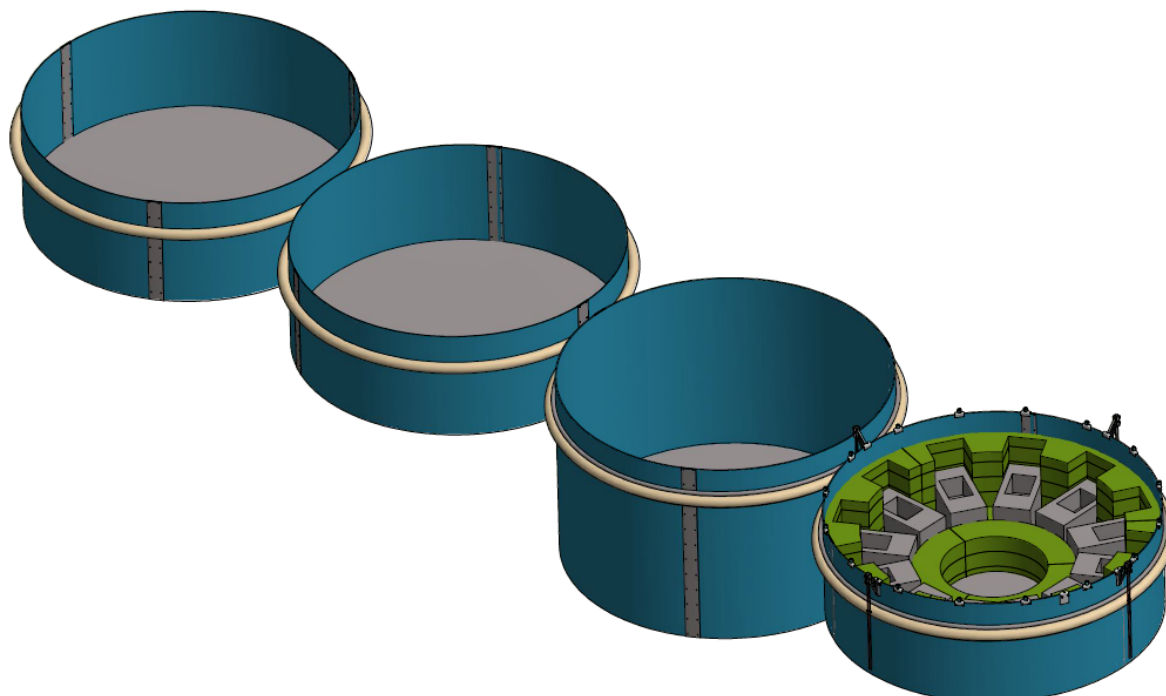
I alt 5 ulike modellkonfigurasjoner har blitt testet gjennom skalerte modellforsøk i Slepetanken på Tyholt, med tenkt modellskala 1:27. Fire av modellene hadde en sirkulærsylindrisk form, med forskjellig stivhet og dypgang. I tillegg ble en fleksibel dukbasert lukket merd festet i en fleksibel flytekrage testet.

Table 2: Beskrivelse av modellkonfigurasjoner ved skalerte modellforsøk.

Modellkonfigurasjon	Beskrivelse
K10	Stiv sirkulærsylindrisk modell lastet med faste vekter tilsvarende frosset internt vannvolum. Dypgang lik 25 % av diameter.
K11	Stiv sirkulærsylindrisk modell med internt vannvolum. Dypgang lik 25 % av diameter.
K12	Stiv sirkulærsylindrisk modell med større dypgang, lik 50 % av diameter.
K21	Elastisk sirkulærsylindrisk modell med dypgang lik 25 % av diameter.
K51	Fleksibel dukbasert merd med form som en halvkule, hvor duken er festet til en tradisjonell fleksibel flytekrage.

Table 3: Modellspesifikasjoner for de ulike modellene som ble testet ved skalerte modellforsøk i Slepetanken.

Parameter	Symbol	K10 Verdi	K11 Verdi	K12 Verdi	K21	K51
Diameter	D	1,50 m	1,50 m	1,50 m	1,50 m	1,50 m
Dypgang	d	0,375 m	0,375 m	0,75 m	0,375 m	0,75 m
Fribord	f	0,15 m	0,15 m	0,15 m	0,15 m	0,08 m
Masse	M	666,3 kg	48,5 kg	61,2 kg	36,1 kg	< 3 kg
Vertikalt tyngdepunkt	VCG	-0,186 m	-0,223 m	-0,472 m	-0,277 m	-
Gyrasjonsradius, stamp	r55/D	0,302	0,330	0,340	0,310	-
Metasenterhøyde	GM	0,48 m	0,11 m	0,06 m	0,11 m	-



PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	MASS
1	1	S1140-1000-K10	671,359 kg
2	1	S1140-1200-K12	61,151 kg
3	1	S1140-2100-K21	36,088 kg
4	1	S1140-3100-K31	36,088 kg

4.2 Fortøyningsoppsett

Modellene ble festet med fire fortøyningslinjer, to i langsgående retning av tanken og to på tvers av tanken. Alle fire fortøyningslinjene var utstyrt med hanefot, slik at antall festepunkter fra fortøyning på modell var 8. Hver fortøyningsline løp rundt en trinse for så å bli festet i en spiralfjær. Spiralfjærene som ble brukt i fortøyningen ga en effektiv stivhet $k_{eff} = 180 \text{ N/m}$ i jag. Forspenning i linene var om lag 40 N.

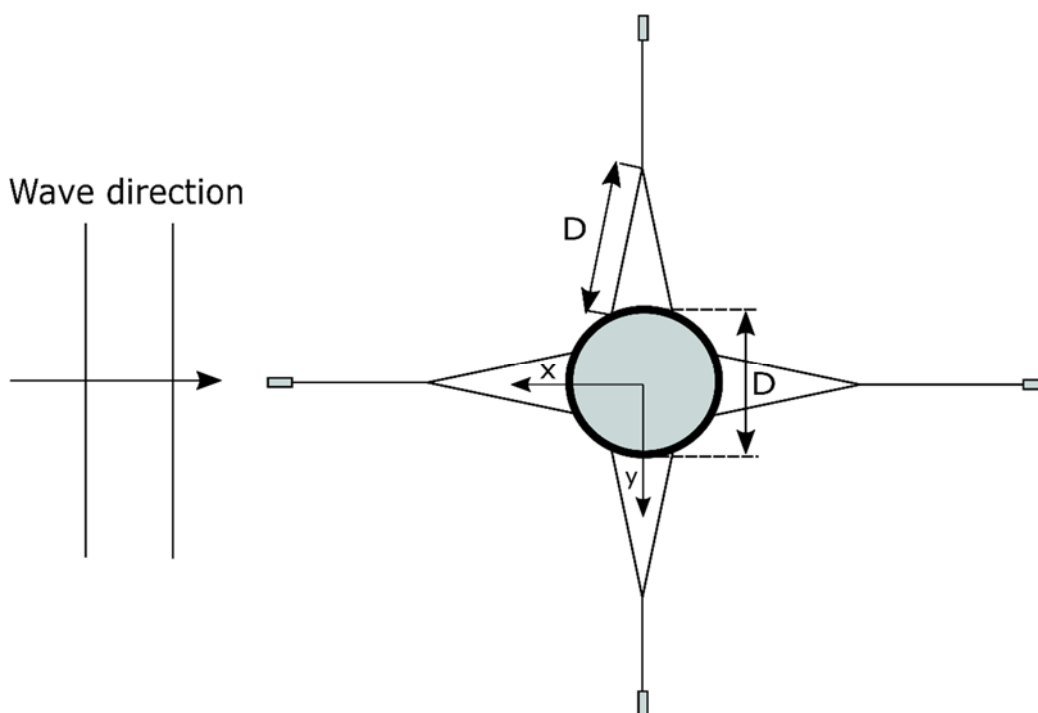


Figure 1: Fortøyningsarrangement sett ovenfra. Lengde på haneføtter var lik diameter av merdmodell. Et koordinatsystem er definert med origo i fri overflate og vertikal z-akse gjennom geometrisk senter av modellen.

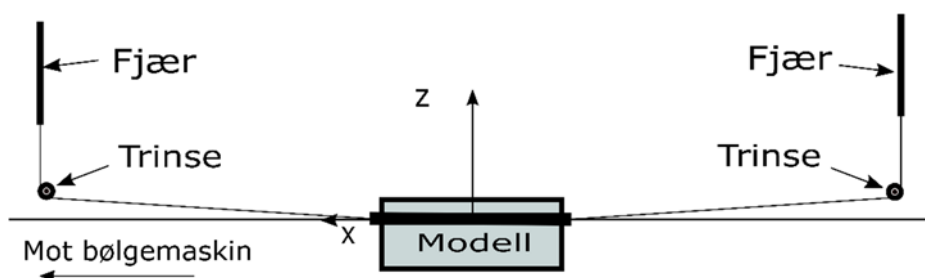


Figure 2: Fortøyningsarrangement sett fra siden. Fortøyningslinene hadde en vinkel på ca. 5 grader med vannoverflaten. Trinsene var hevet ca. 30 cm over stille vannsnivå.

4.3 Instrumentering

Lastseller festet i kobling mellom fortøyningsline og spiralfjær ble brukt for å måle strekk i alle fire fortøyningslinjer. Akselerasjoner av modell ble målt med akselerometere plassert på 0 grader, 90 grader og 180 grader langs flytekragen, hvor 0 grader er mot bølgemaskin. Akselerometerne hadde en kapasitet på 2g. Bevegelser av merdmodell ble målt med det optiske målesystemet Qualisys Oqus, hvor bevegelser til åtte markører distribuert langs øvre rand av modellen ble logget ved triangulering av kamerabilder. Dette muliggjorde måling av elastiske deformasjoner av modellene. Bølgehevning inne i modell ble målt ved bruk av konduktiv tape festet på modellens sidevegg ved seks ulike lokasjoner. Tilsvarende ble seks bølgemålere plassert langs periferien av modellens utside. Ytterligere tre bølgemålere ble plassert en avstand fra modellene, en på siden mot bølgemaskin, en på siden av modell mot tankvegg og en på siden mot stranden.

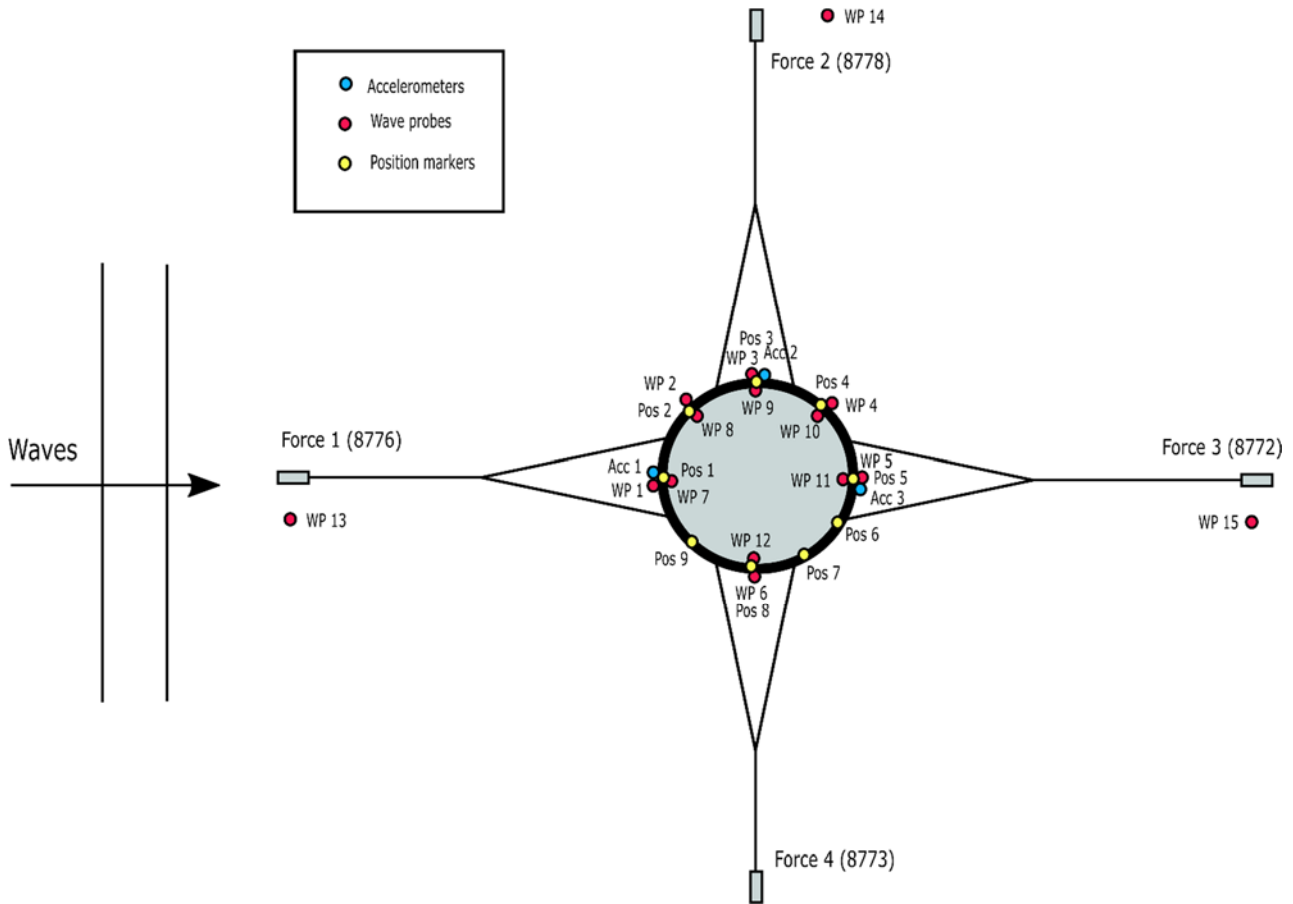


Figure 3: Instrumentering av merdmodell. Plassering av akselerometere, posisjonsmarkører (oqus), bølgeomålere og lastseller.

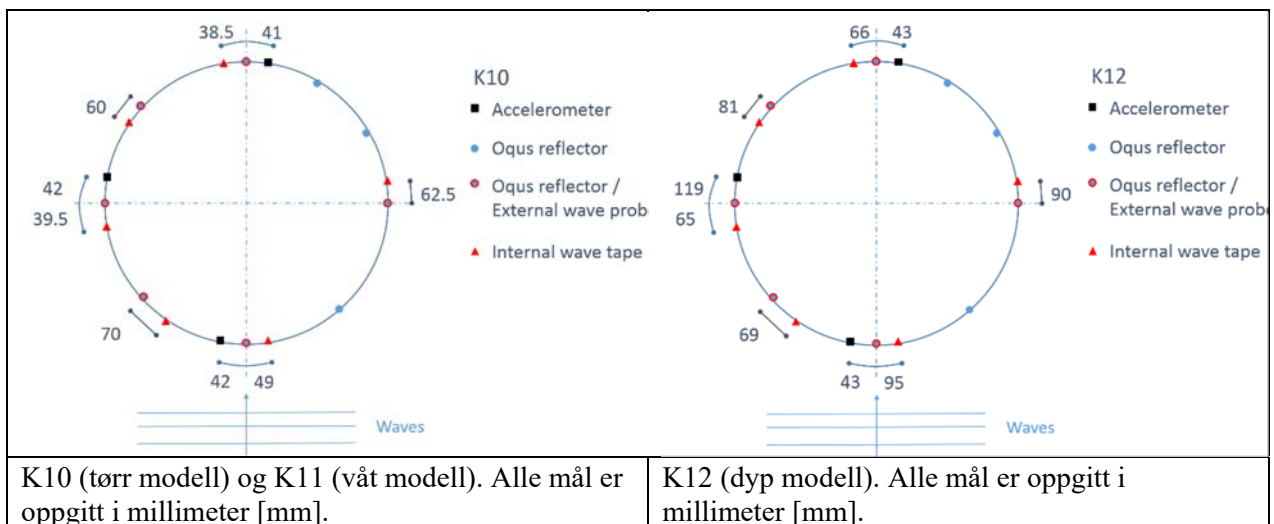


Figure 4: Detaljer om plassering av instrumentering på merdmodeller.

4.4 Innsvingningsforsøk

Egenperioder og dempingsrater ble undersøkt ved gjennomføring av innsvingningsforsøk i jag, hiv og stamp for alle modellkonfigurasjoner som ble testet. Også rull ble testet for noen konfigurasjoner. Nullkryssingsperiode estimeres fra måletidsseriene. Målinger og observasjoner viser at

innsvingningsamplituder i hiv og jag dempes raskt ut, og forstyrrelser som antageligvis skyldes bølgerrefleksjon fra tankvegger påvirker målte bevegelser. Dempingsnivået i forsøkene beregnes ved bruk av logaritmisk dekrement, hvor to påfølgende svingeamplituder blir sammenlignet.

Det logaritmiske dekrementet δ er gitt som

$$\delta = \ln\left(\frac{x_a^i}{x_a^{i+1}}\right)$$

hvor $x_a^i = x(t^i)$ og $x_a^{i+1} = x(t^i + T)$ er to påfølgende (positive) svingeamplituder. Dersom amplituder med n antall perioders mellomrom sammenlignes, altså $x(t^i) = x_a^i$ og $x(t^i + nT) = x_a^{i+n}$, får vi

$$\delta_n = \frac{1}{n} \ln\left(\frac{x_a^i}{x_a^{i+n}}\right)$$

Relasjonen mellom dempingsraten $\chi = b/b_{crit}$ og det logaritmiske dekrementet er

$$\chi = \frac{\delta}{2\pi}$$

Table 4: Svingeperioder og dempingsrater fra innsvingningsforsøk. (*) Innsvingning i jag ble raskt dempet ut, og dempingen hadde tydelig effekt på svingeperioden. Første nullkryssingsperiode er derfor oppgitt.

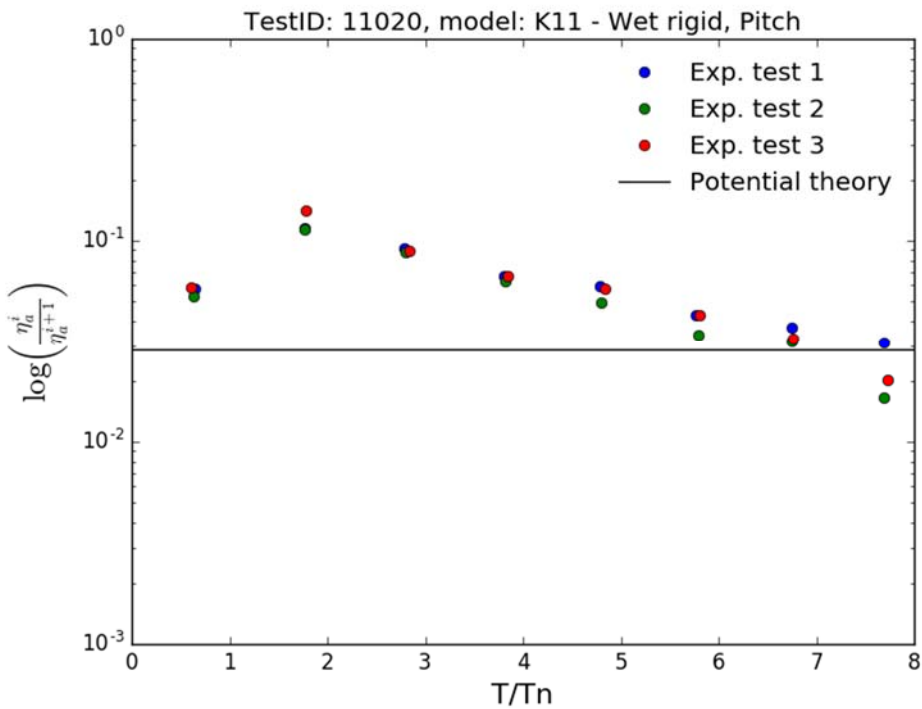
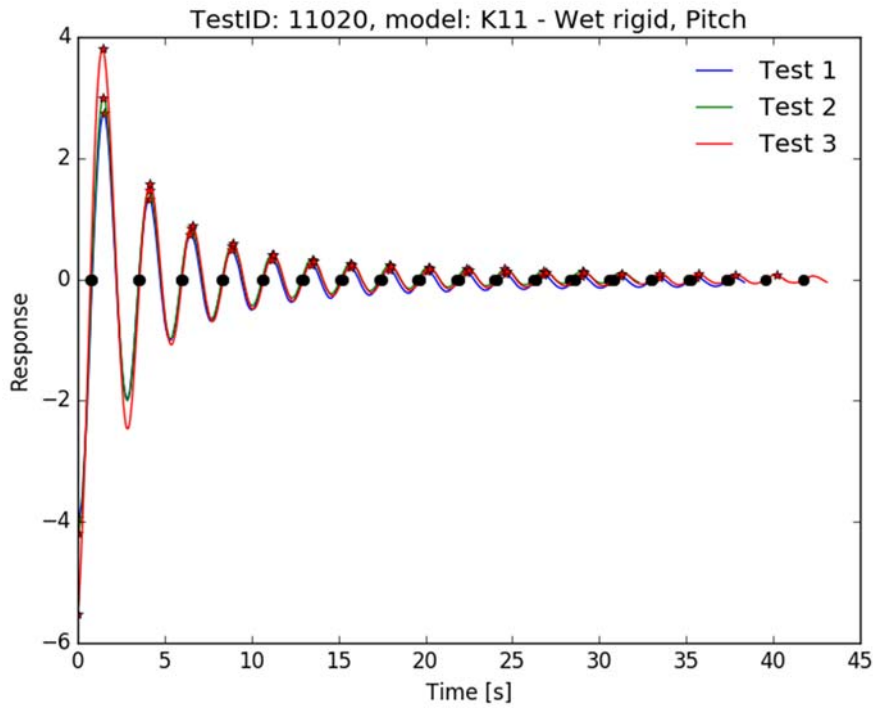
Modell	Jag		Hiv		Stamp	
	T_1 [s]	χ	T_3 [s]	χ	T_5 [s]	χ
K10	13,7 (*)	> 20 %	1,65	11 %	1,47	5 % - 7 %
K11	11,4 (*)	> 20 %	1,67	13 %	2,74	3 % - 12 %
K12	22,8 (*)	>20 %	2,00	6 % - 8 %	2,58	6 % - 14 %
K51	23,5	10 %	-	-	-	-

Den store dempingen i jag for alle modeller bortsett fra fleksibel dukmerd (K51), kan skyldes transiente hydrodynamiske effekter knyttet til viskøs separasjon. Dempingen økte ved avtakende svingeperiode og døde helt ut etter bare 2-3 svingeperioder. Dempingen i stamp er ikkelineær og kan forklares med viskøse effekter. Demping i hiv er vanskelig å estimere på grunn av refleksjon av radierte bølger fra tankvegg, noe som raskt influerer på hivbevegelsen.

Ikke-lineær demping i stamp kan modelleres ved

$$b_v = k \frac{2c_{55}\eta_{5a}}{\omega_5}$$

hvor faktoren $k = 0,08 \text{ m}^{-1}$ er funnet fra lineær regresjon av det logaritmiske dekrementet for modell K11.



4.5 Testkondisjoner

Table 5: Testkondisjoner for regulære bølger i fullskala.

λ/D	Bølgelengde λ [m]	Bølgeperiode T [s]	Bølgehøyde H [m]		
			$\varepsilon=1/30$	$\varepsilon =1/45$	$\varepsilon =1/60$
0,49	20,0	3,58	0,67	0,44	0,33
0,58	23,4	3,87	0,78	0,52	0,39
0,59	24,0	3,92	0,80	0,53	0,40
0,74	30,0	4,38	1,00	0,67	0,50
0,76	30,8	4,44	1,03	0,68	0,51
0,99	40,0	5,06	1,33	0,89	0,67
1,03	41,6	5,16	1,39	0,93	0,69
1,11	45,0	5,37	1,50	1,00	0,75
1,23	50,0	5,66	1,67	1,11	0,83
1,68	68,0	6,60	2,27	1,51	1,13
1,76	71,4	6,76	2,38	1,59	1,19
1,98	80,0	7,16	2,67	1,78	1,33
2,19	88,7	7,54	2,96	1,97	1,48
2,31	93,7	7,75	3,12	2,08	1,56
2,47	100,0	8,00	3,33	2,22	1,67
2,96	120,0	8,77	4,00	2,67	2,00
2,97	120,3	8,78	4,01	2,67	2,01
3,46	140,0	9,47	4,67	3,11	2,33
3,95	160,0	10,12	5,33	3,56	2,67
4,24	171,6	10,48	5,72	3,81	2,86
4,53	183,6	10,84	6,12	4,08	3,06
5,58	226,0	12,03	7,53	5,02	3,77
6,43	260,2	12,91	8,67	5,78	4,34

Table 6: Testkondisjoner for regulære bølger i modellskala.

λ/D	Bølgelengde λ [m]	Bølgeperiode T [s]	Bølgehøyde H [m]		
			$\varepsilon=1/30$	$\varepsilon=1/45$	$\varepsilon=1/60$
0,49	0,74	0,69	0,025	0,016	0,012
0,58	0,87	0,75	0,029	0,019	0,014
0,59	0,89	0,76	0,030	0,020	0,015
0,74	1,11	0,84	0,037	0,025	0,019
0,76	1,14	0,85	0,038	0,025	0,019
0,99	1,48	0,97	0,049	0,033	0,025
1,03	1,54	0,99	0,051	0,034	0,026
1,11	1,67	1,03	0,056	0,037	0,028
1,23	1,85	1,09	0,062	0,041	0,031
1,68	2,52	1,27	0,084	0,056	0,042
1,76	2,65	1,30	0,088	0,059	0,044
1,98	2,96	1,38	0,099	0,066	0,049
2,19	3,29	1,45	0,110	0,073	0,055
2,31	3,47	1,49	0,116	0,077	0,058
2,47	3,70	1,54	0,123	0,082	0,062
2,96	4,44	1,69	0,148	0,099	0,074
2,97	4,46	1,69	0,149	0,099	0,074
3,46	5,19	1,82	0,173	0,115	0,086
3,95	5,93	1,95	0,198	0,132	0,099
4,24	6,35	2,02	0,212	0,141	0,106
4,53	6,80	2,09	0,227	0,151	0,113
5,58	8,37	2,32	0,279	0,186	0,140
6,43	9,64	2,48	0,321	0,214	0,161

Table 7: Parametere for definisjon av irregulære sjøtilstander basert på JONSWAP spekter.

Vær ID	Hs [m]	Tp [s]	γ [-]
8800	1,5	4,7	3,81
8810	2,0	5,5	3,59

Table 8: Parametere for definisjon av irregulær sjøtilstand basert på "pink noise".

Vær ID	Hs [m]	f_{min} [Hz]	f_{max} [Hz]
8900	1,0	0,367	1,50
8910	2,0	0,367	1,50

5 Sjøegenskaper

Sjøegenskaper til generiske lukket-merd konstruksjoner er studert gjennom skalerte modellforsøk og numeriske beregninger for alle tre hovedkategoriene definert over. Det vil si for stiv merd, elastisk merd og fleksibel posemerd. Beregninger av bølgerespons basert på lineær potensialteori i frekvensplanet ble gjennomført ved bruk av programvaren WAMIT.

5.1 Stabilitet

Statisk stabilitet av en lukket merd finnes som for skip og andre flytende innretninger ved å beregne initialstabiliteten gitt ved metasenterhøyden GM , definert ved

$$GM = KB + BM - KG$$

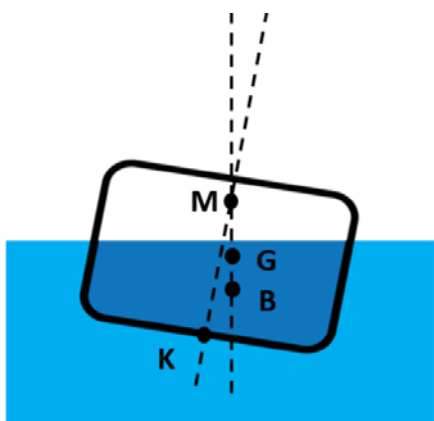


Figure 5: Sentrale definisjoner ved beregning av metasenterhøyde.

hvor KB er oppdriftssenters vertikale avstand fra kjølpunktet (bunnen) K , BM er avstand fra oppdriftssenter B til metasenteret M og KG er tyngdepunktets vertikale plassering målt fra kjølpunktet (se Figur 1). Metasenterets vertikale avstand fra oppdriftssenteret finnes fra

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

hvor I er andre arealmoment av vannplanarealet til hele konstruksjonen og ∇ er totalt volumdeplasement. Konstruksjonen er statisk stabil dersom $GM > 0$.

Fri væskeoverflate av inneholdt vannvolum i en lukket merd vil ha en destabiliserende effekt på konstruksjonen, i forhold til en tilsvarende konstruksjon hvor inneholdt vannvolum er erstattet med en fast masse med samme tyngdepunkt. Dette kommer av at en statisk krengevinkel av merden vil forskyve merdens tyngdepunkt sideveis, slik at opprettende moment reduseres (se Figur 1).

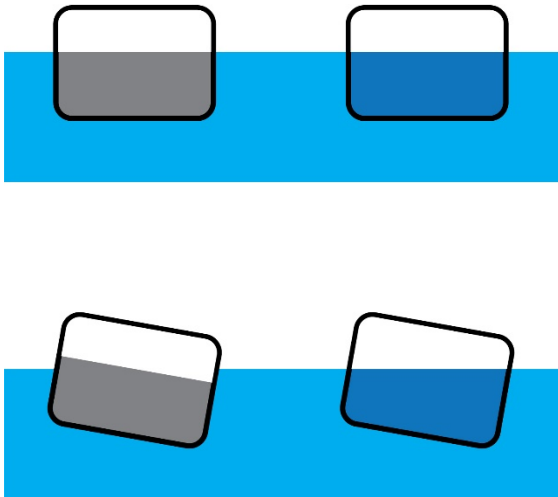


Figure 6: Effekt av inneholdt vannvolum på stabilitet. Vannet har en destabiliserende effekt.

Effekt av fri væskeoverflate kan beregnes med følgende formel

$$GM = KB + BM - KG - GG'$$

$$GG' = \sum \frac{\rho' i}{\rho \nabla}$$

GG' er en virtuell heving av massesenteret som følge av den frie overflaten. ρ' , ρ og i er tetthet til vannet inne i merden, tetthet til vann utenfor merden og arealtregningsmomentet til vannoverflaten til vannet inne i merden, henholdsvis.

Betraktningene og formlene gitt over gjelder for små krengevinkler. For større krengevinkler vil endring i geometri over høyden ha betydning for opprettende moment på konstruksjonen, og dermed også ha en effekt på stabiliteten. For en lukket merd med tilleggsoppsdrift fra en slank flytekrage vil en krengeving gi endring i vannlinjeareal av flytekragen og dermed ha effekt på opprettende moment. En reduksjon av vannlinjearealet reduserer opprettende moment på konstruksjonen. Dette beskrives av GZ-kurve, som er momentarm til opprettende moment om tyngdepunktet, som funksjon av krengevinkel (Figure 7). Statisk stabilitet ved gitt krengevinkel krever at $GZ > 0$.

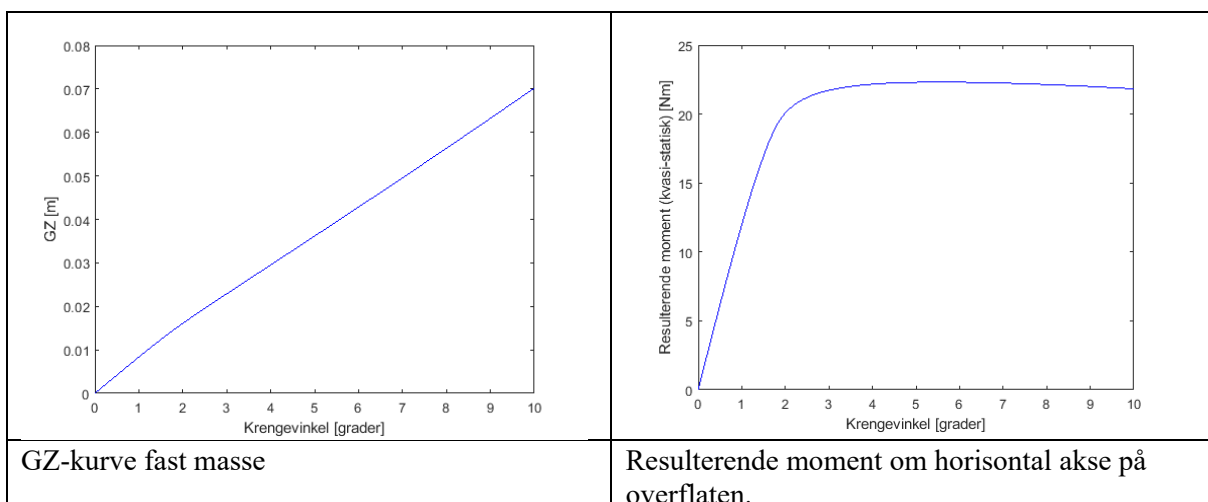


Figure 7: GZ-kurve for merdgeometri uten effekt av indre fri overflate (venstre). Opprettende moment fra flytekrage ved krengeving (høyre).

Stigningstallet til GZ-kurven ved null krengevinkel gir GM verdien for konstruksjonen.

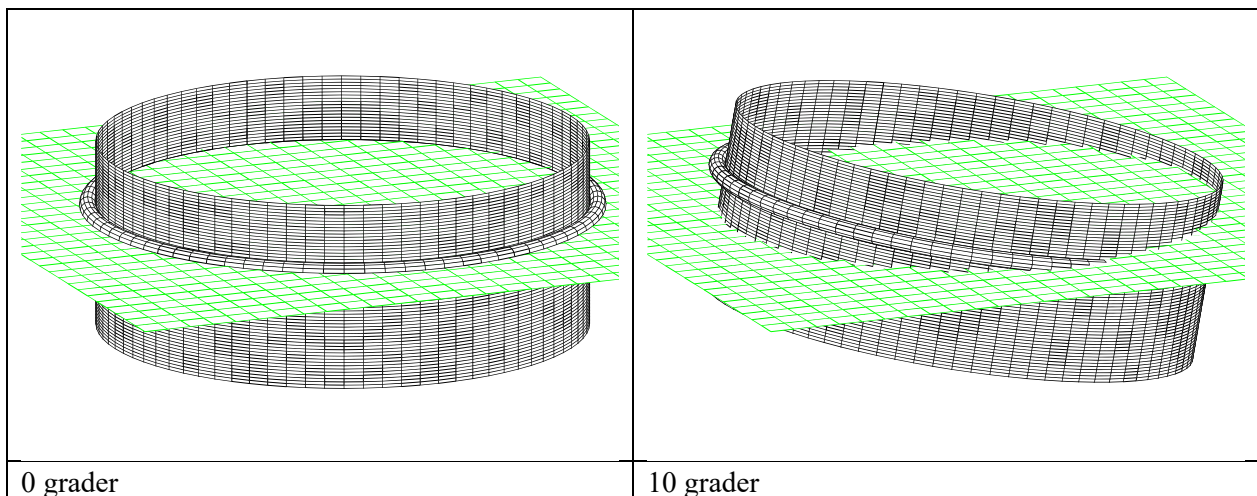


Figure 8: Reduksjon av opprettende moment på grunn av neddykking av flytekrage.

Figure 7 viser opprettende moment om horisontal akse på vannoverflaten som funksjon av krengevinkel. Opprettende moment flater ut når store deler av flyteren kommer under/ut av vann. Merk at effekt av fri overflate inne i merden er ikke tatt hensyn til i beregningen av GZ-kurve og opprettende moment.

Det er viktig å merke seg at flyteren gir et bidrag til stabiliteten til merden. Et vannvolum inne i merden med fri overflate bidrar til en reduksjon av statisk stabilitet. Ved design av flytende lukket merder med fri overflate må man ta hensyn til mulige effekter på stabiliteten ved utforming av flyter og merdkonstruksjon.

5.2 Bølgeinduserte bevegelser

5.2.1 Stiv grunn modell

Bølgeinduserte bevegelser ble studert for stiv merdmodell med vann (konfigurasjon K11) og samme modell men hvor vannet i merden ble erstattet med faste vekter plassert slik at treghetsegenskapene til merden ble som om den inneholdt frosset vann (konfigurasjon K10). Hensikten med dette var å studere hvilken effekt intern fri væskeoverflate og sloshing har på konstruksjonsresponsen i bølger og for å studere effekter av ekstern hydrodynamikk isolert sett.

Jag

Målt respons i jag fra forsøk i mars 2017 med stiv modell er sammenlignet med beregnet respons fra lineær potensialteori (WAMIT) i Figure 9. Tilsvarende er målt og beregnet respons for stiv modell i tørr konfigurasjon sammenlignet i Figure 10. Fri overflate i merden har en tydelig effekt på jag-responsen. Mens jagresponsen nesten kansellerer fullstendig ved bølgeperiode $T=1,4$ s, som er i nærheten av egenperioden til første mode f_{11} av sloshing ($T_{n11}=1.50$ s), så observeres en kraftig forsterkning av jagbevegelser ved bølgeperioden $T=1.04$ s, sammenlignet med respons for tørr modell. Denne bølgeperioden samsvarer med egenperiode T_{n21} til sloshing mode f_{21} . Resultater fra forsøk viser jagrespons som er over 2,5 ganger større for våt modell enn for tørr modell ved denne perioden. Det også verdt å merke seg en sterk effekt av bølgesteilhet (ikkelineær effekt) på jagrespons av våt modell for denne bølgeperioden, hvor økt bølgesteilhet gir kraftigere forsterkning av respons. Beregningsresultater fra WAMIT viser at jagresponsen for våt modell blir sensitiv for bølgeperiode for lavere bølgeperioder, hvor det observeres flere tilfeller med kansellering eller forsterkning av jagresponsen.

Hiv

Bølgerespons i hiv for stiv modell fra forsøk i mars 2017 er sammenlignet med beregnet hivrespons fra WAMIT for våt konfigurasjon (K11) i Figure 11 og for tørr konfigurasjon (K10) i Figure 12. Sammenligning mellom tørr og våt konfigurasjon viser ingen spesiell effekt av sloshing på hivbevegelsen, verken fra forsøk eller numeriske beregninger. Dette er samsvar med lineær potensialteori. Beregnet hivrespons har en resonanstopp ved $T=1,70$ s for begge konfigurasjoner (K10 og K11). Størst hivrespons fra forsøk er målt for en noe høyere bølgeperiode. Dette kan skyldes veggeffekter fra tanken, altså at radierte bølger fra modell reflekteres fra sideveggene i bølgetanken og påvirker responsen. Effekter av bølgerrefleksjon fra tankvegger ble studert numerisk med WAMIT. Beregningsresultater viser at dette påvirker hivresponsen (se eget avsnitt).

Stamp

Sammenligning av resultater fra modellforsøk og numeriske beregninger med WAMIT for tørr og våt modellkonfigurasjon, viser at fri overflate inne i merden har en klar påvirkning på bølgeinduserte bevegelser i stamp (se Figure 13 og Figure 14). Egenperioden i stamp er beregnet til $T_5=1,34$ s for tørr konfigurasjon og $T_5=2,33$ s for våt konfigurasjon. En effekt av fri væskeoverflate er en redusert hydrostatisk vannplanstivhet og dermed reduksjon av metasenterhøyden GM. Dette medfører en økning av egenperioden. Sammenligning mellom målt respons i stamp fra modellforsøk med beregnet respons fra WAMIT for våt konfigurasjon viser dårlig samsvar for høyere bølgeperioder ($T>1,5$ s). Spesielt store avvik mellom beregnet og målt respons i stamp observeres omkring resonansperioden i stamp, hvor effekten av demping er stor (se Figure 13). Viskøs separasjon fra skarpe hjørner av merden vil bidra til ikkelineær demping. Effekter av demping kan forstås ved å studere responsen til en dempet harmonisk oscillator (linært masse-fjær-demper system) hvor det er dempingen som begrenser responsen ved resonans. Potensialdempingen i stamp for gitt modellgeometri beregnet med WAMIT er vist i Figure 25. Da effekt av fri overflate er en økt egenperiode i stamp, innebærer det samtidig at relativ effekt av potensialdemping ved resonans reduseres.

For tørr modellkonfigurasjon gir en lineær tilleggsdemping i stamp på 5 % av kritisk demping bedre samsvar mellom beregnet respons og måling fra modellforsøk. Merk at bevegelser i stamp er koblet med bevegelser i jag, slik at stamprespons kan ikke forstås isolert fra jag.

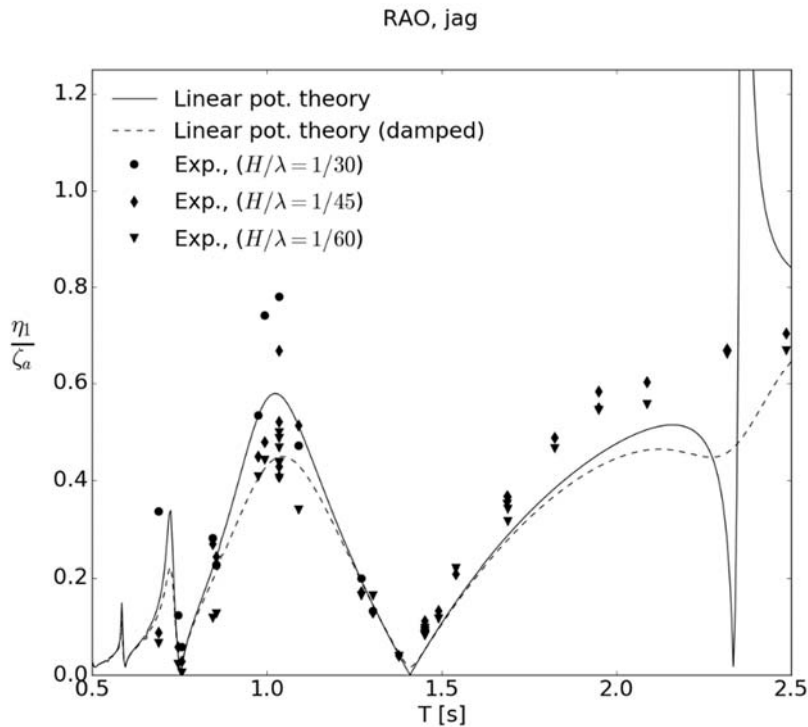


Figure 9: Respons amplitude operator (RAO) i jag fra modellforsøk av modell K11 (våt), sammenlignet med beregnet respons fra lineær potensialteori (WAMIT) uten tilleggsdemping (heltrukken kurve) og med tilleggsdemping lik 5% av kritisk demping (stiplet kurve).

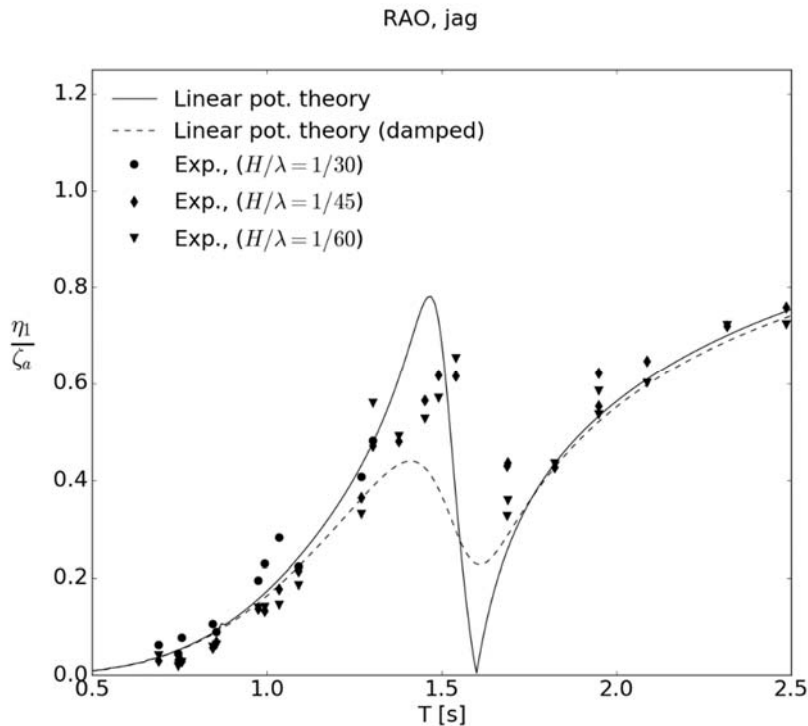


Figure 10: Respons amplitude operator (RAO) i jag fra modellforsøk av modell K10 (tørr), sammenlignet med beregnet respons fra lineær potensialteori (WAMIT) uten tilleggsdemping (heltrukken kurve) og med tilleggsdemping lik 5% av kritisk demping (stiplet kurve).

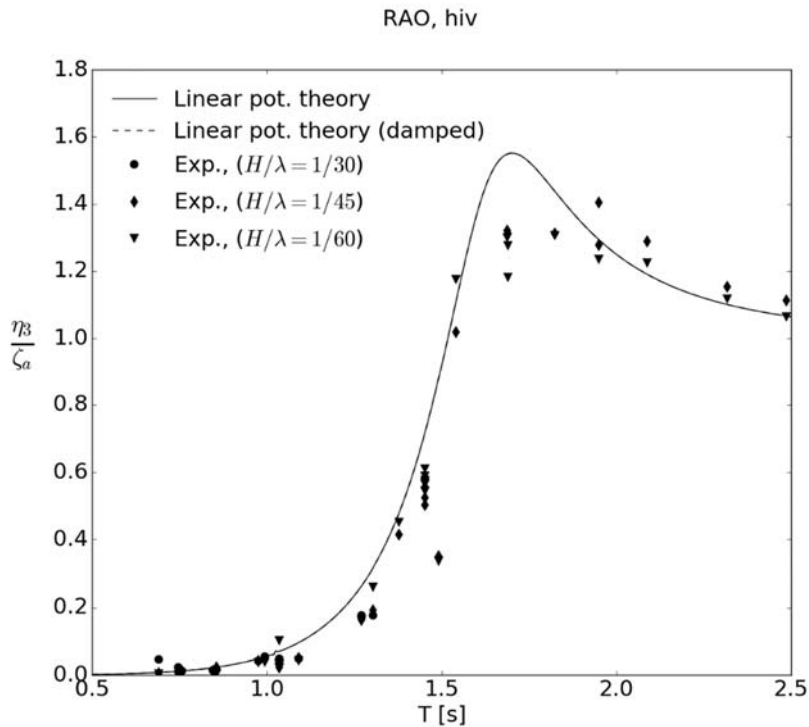


Figure 11: Respons amplitude operator (RAO) i hiv fra modellforsøk av modell K11 (våt), sammenlignet med beregnet respons fra lineær potensialteori (WAMIT) uten tilleggsdemping (heltrukken kurve) og med tilleggsdemping lik 5% av kritisk demping (stiplet kurve).

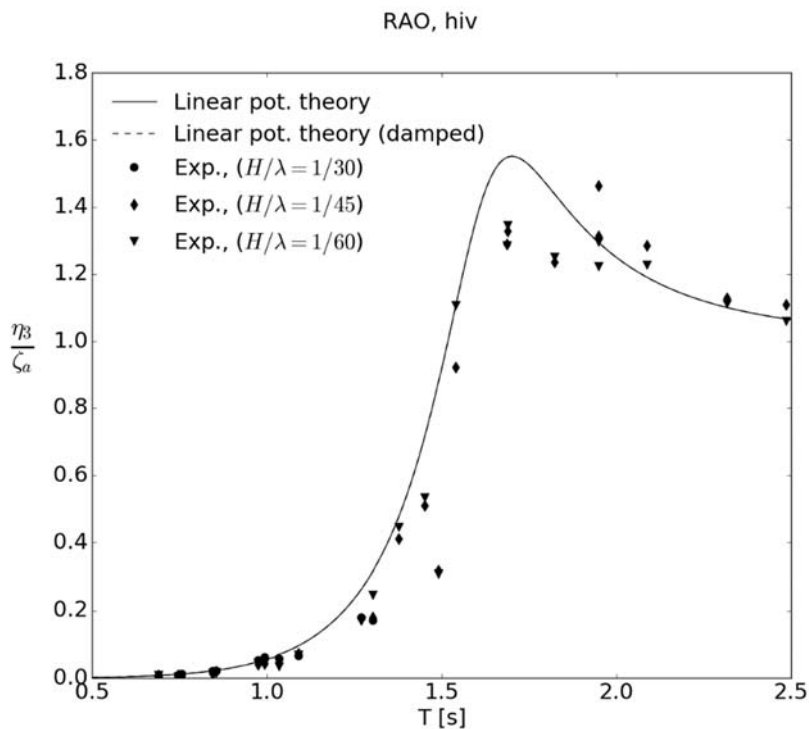


Figure 12: Respons amplitude operator (RAO) i hiv fra modellforsøk av modell K10 (tørr), sammenlignet med beregnet respons fra lineær potensialteori (WAMIT) uten tilleggsdemping (heltrukken kurve) og med tilleggsdemping lik 5% av kritisk demping (stiplet kurve).

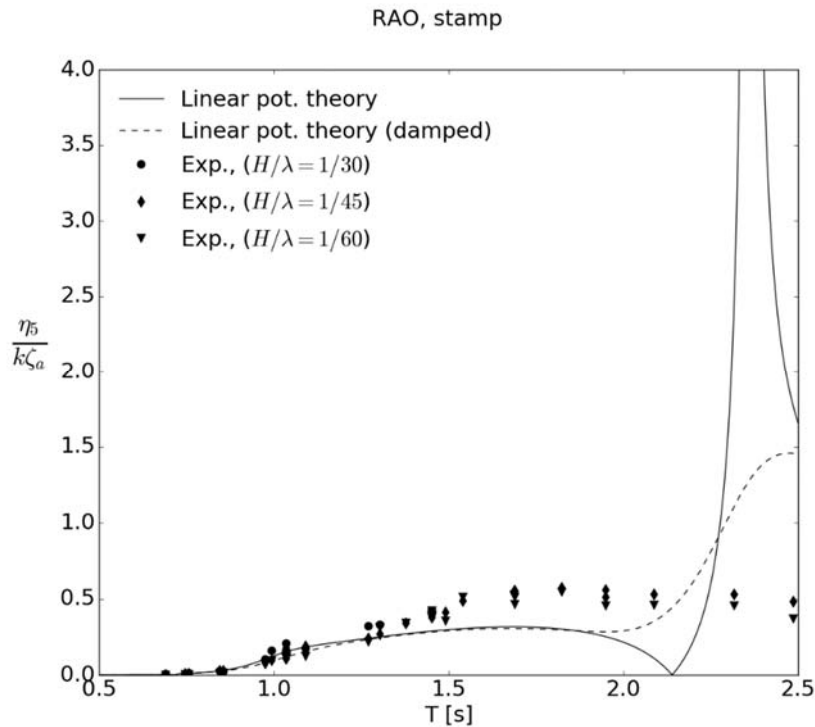


Figure 13: Respons amplitude operator (RAO) i stamp fra modellforsøk av modell K11 (våt), sammenlignet med beregnet respons fra lineær potensialteori (WAMIT) uten tilleggsdemping (heltrukken kurve) og med tilleggsdemping lik 5% av kritisk demping (stiplet kurve).

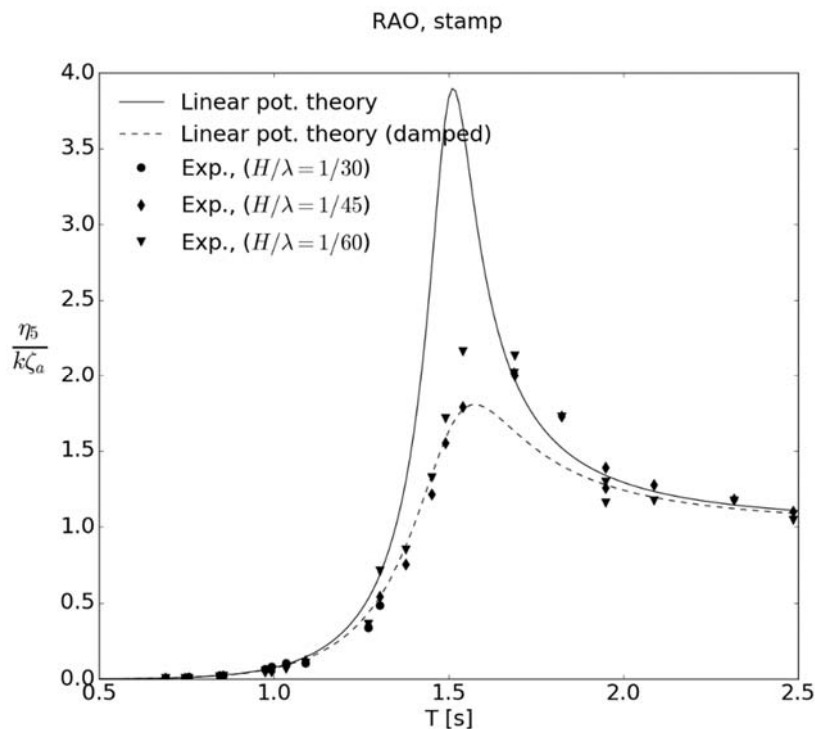


Figure 14: Respons amplitude operator (RAO) i stamp fra modellforsøk av modell K10 (tørr), sammenlignet med beregnet respons fra lineær potensialteori (WAMIT) uten tilleggsdemping (heltrukken kurve) og med tilleggsdemping lik 5% av kritisk demping (stiplet kurve).

5.2.2 Stiv dyp modell

En modell med dypgang lik radius til merden ble testet i regulære bølger. Økt dypgang gir generelt høyere egenperiode i hiv og jag på grunn av større masse. I tillegg reduseres potensialdempingen i hiv, da avstand mellom bunn av modell og fri overflate økes.

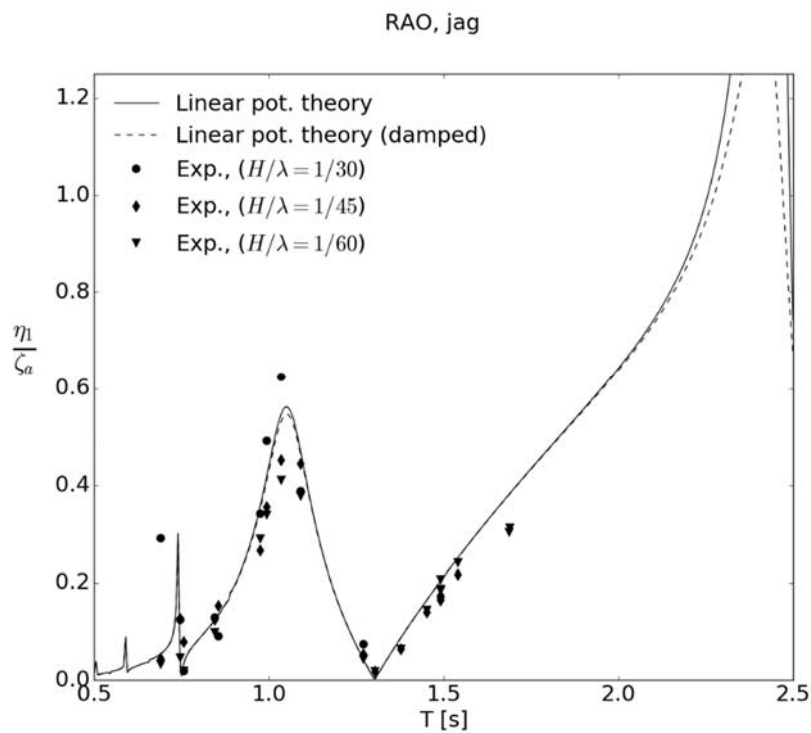


Figure 15: RAO i jag. Sammenligning mellom beregnet respons fra WAMIT og målt respons fra modellforsøk med dyp modell ($h/D=0,5$).

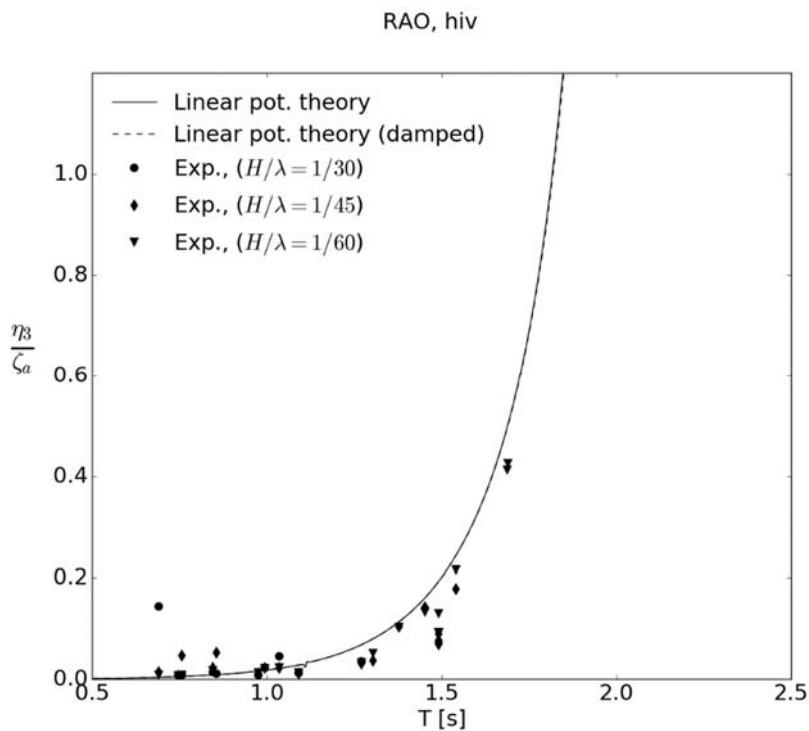


Figure 16: RAO i hiv. Sammenligning mellom beregnet respons fra WAMIT og målt respons fra modellforsøk med dyp modell ($h/D=0,5$).

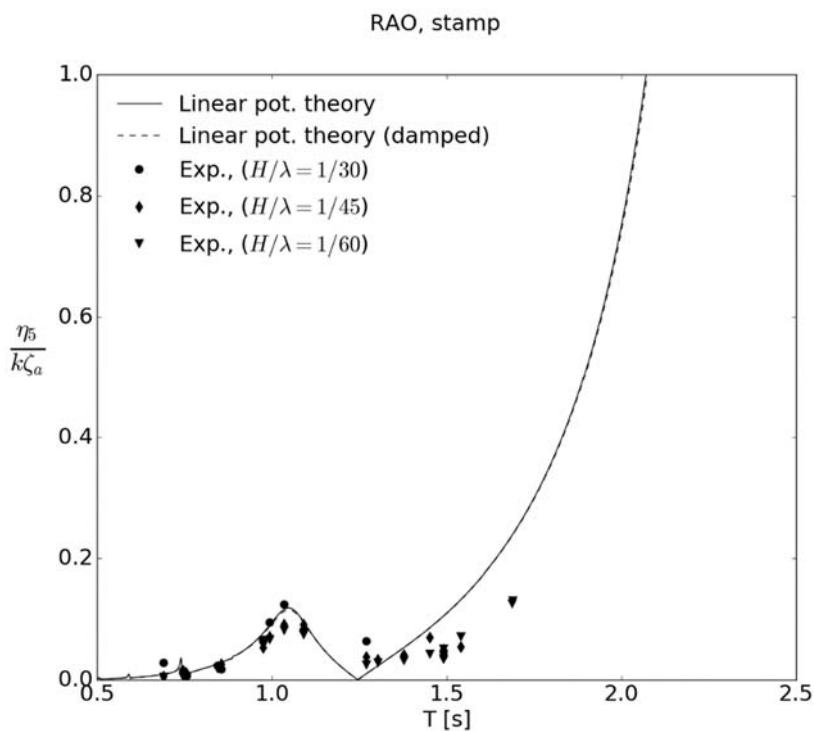


Figure 17: RAO i stamp. Sammenligning mellom beregnet respons fra WAMIT og målt respons fra modellforsøk med dyp modell ($h/D=0,5$).

5.2.3 Elastisk modell

Modellforsøk med elastisk merd og dypgang lik 25 % av diameter er sammenlignet med beregnet RAO for tilsvarende stiv modell. Resultater fra forsøk viser stor spredning av jagrespons for bølgeperioder omkring 1,0 s, som for forsøk med stiv modell, men hvor responsamplitudene i jag for elastisk modell er redusert sammenlignet med målt respons av tilsvarende stiv modell.

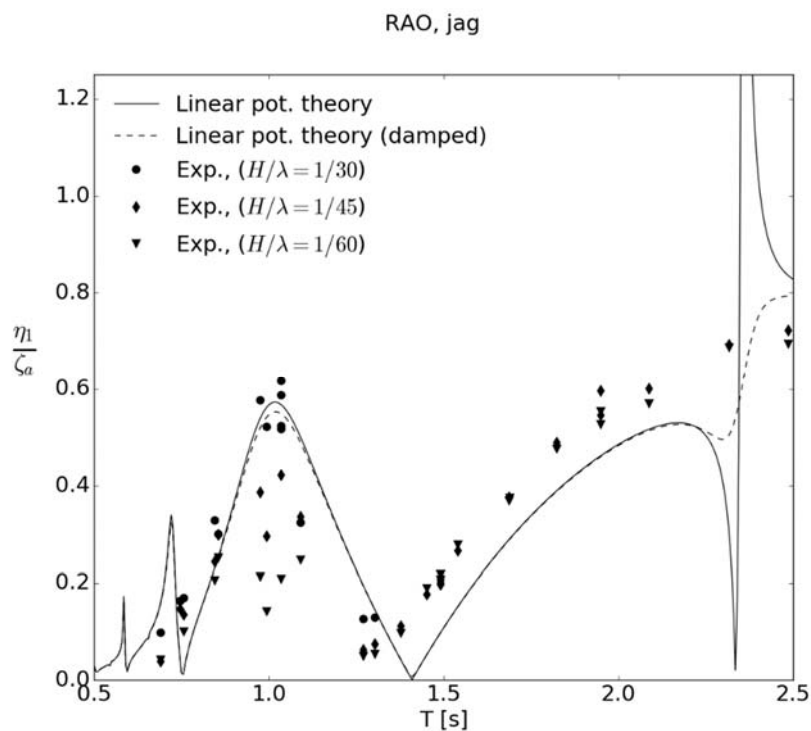


Figure 18: RAO i jag for elastisk modell (K21). Sammenligning mellom beregnet RAO for stiv modell fra WAMIT og målt respons fra skalerte modellforsøk.

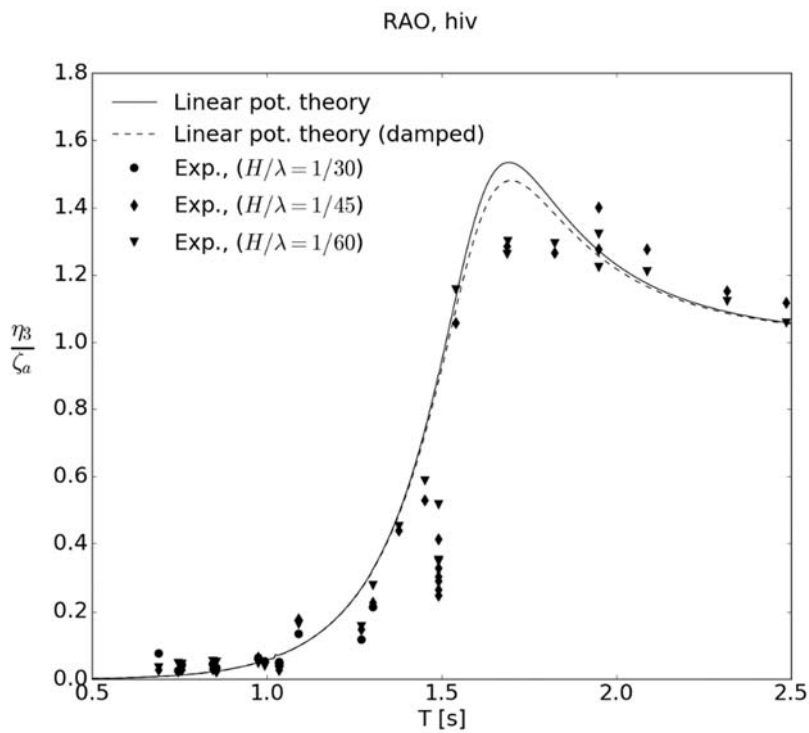


Figure 19: RAO i hiv for elastisk modell (K21). Sammenligning mellom beregnet RAO for stiv modell fra WAMIT og målt respons fra skalerte modellforsøk.

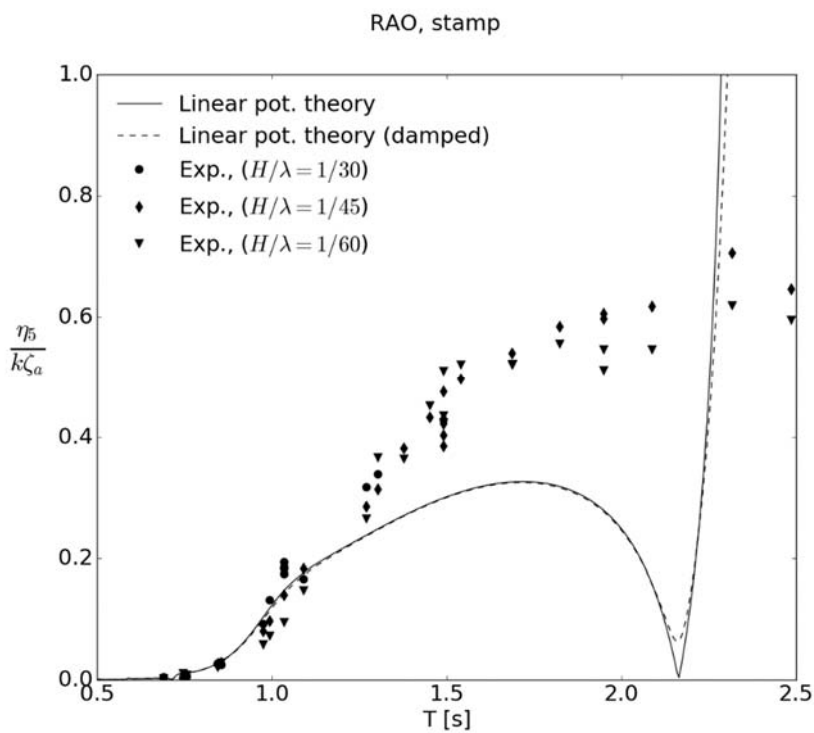


Figure 20: RAO i stamp for elastisk modell (K21). Sammenligning mellom beregnet RAO for stiv modell fra WAMIT og målt respons fra skalerte modellforsøk.

5.2.4 Fleksibel posemerd

En fleksibel posemerd med form som en halvkule og festet i en tradisjonell fleksibel flytekrage ble testet i regulære bølger. Posen ble fylt med vann tilsvarende 100 % fyllingsgrad. Målt respons fra modellforsøk ble sammenlignet med beregnet RAO'er fra WAMIT for en tilsvarende stiv modellgeometri.

Sammenligning viser at hovedtrender til bevegelser i jag, hiv og stamp til en viss grad følger beregnet respons for en stiv halvkuleformet merdmodell.

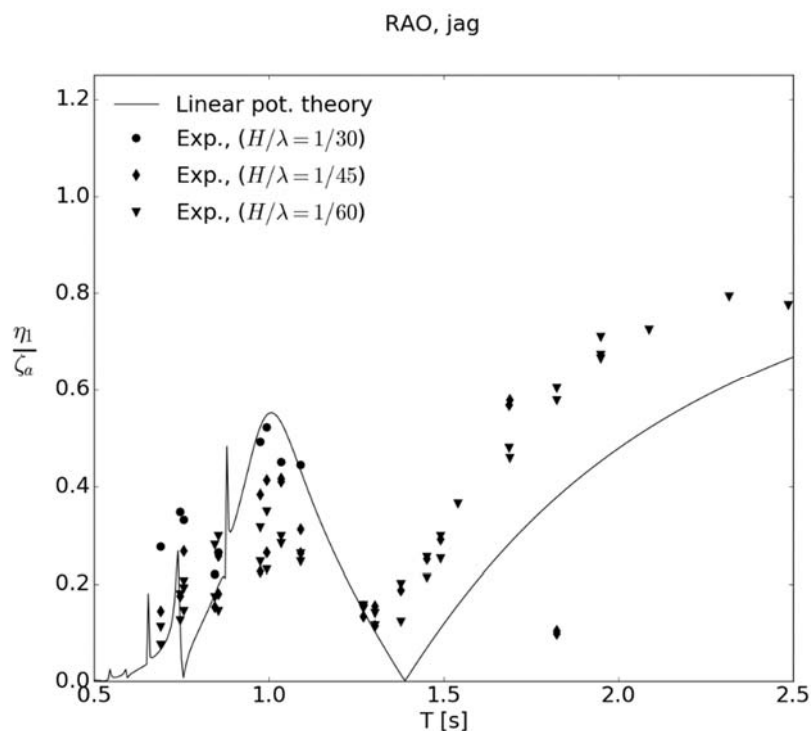


Figure 21: RAO i jag for fleksibel posemerd (K51). Målt respons fra modellforsøk sammenlignet med beregnet RAO for tilsvarende stiv modellgeometri fra WAMIT.

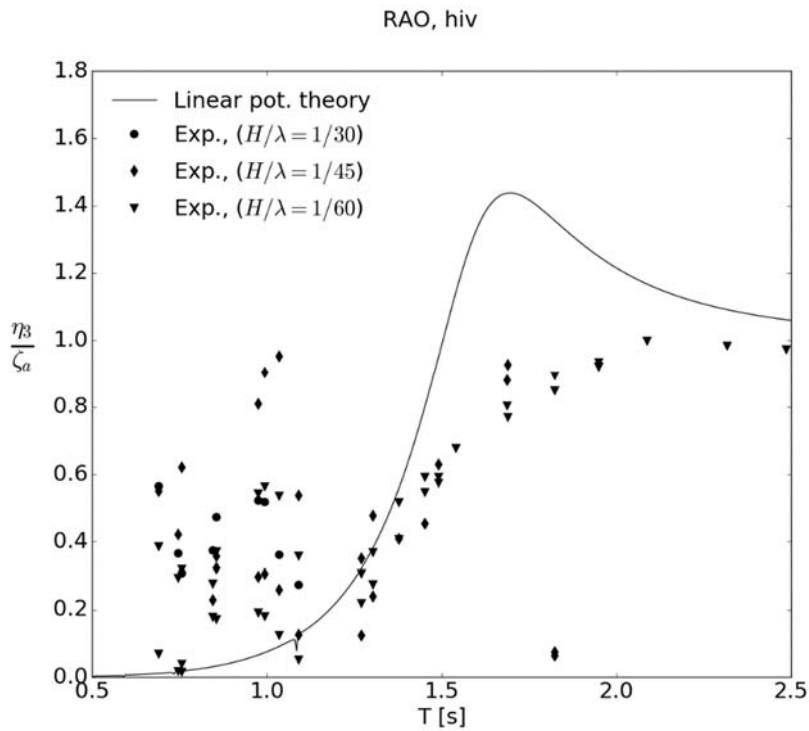


Figure 22: RAO i stamp for fleksibel posemerd (K51). Målt respons fra modellforsøk sammenlignet med beregnet RAO for tilsvarende stiv modellgeometri fra WAMIT.

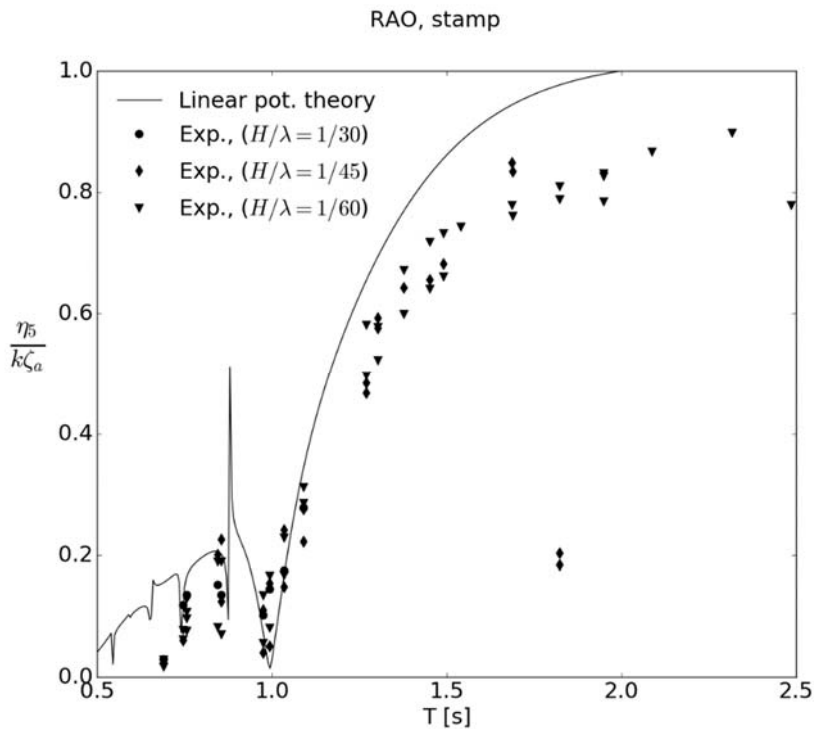


Figure 23: RAO i hiv for fleksibel posemerd (K51). Målt respons fra modellforsøk sammenlignet med beregnet RAO for tilsvarende stiv modellgeometri fra WAMIT.

5.2.5 Bølgerefleksjon fra tankvegg ved modellforsøk

På grunn av begrenset bredde på bølgetanken relativt til størrelse på modell ved forsøkene vil bølger som lages/reflekteres fra modell kunne bli reflektert fra sideveggene i tanken og dermed påvirke innkommende bølger på modell og tilhørende respons. Slik veggeffekt ble undersøkt numerisk med WAMIT, hvor sideveggene i tanken ble modellert ved speilingsteknikk. Dette viste en klar effekt av veggreffleksjon på hivbevegelsen, men ingen nevneverdig effekt på bevegelser i jag og stamp. Slike veggeffekter har stor effekt på midlere bølgedriftskrefter (Zhao et al., 1988).

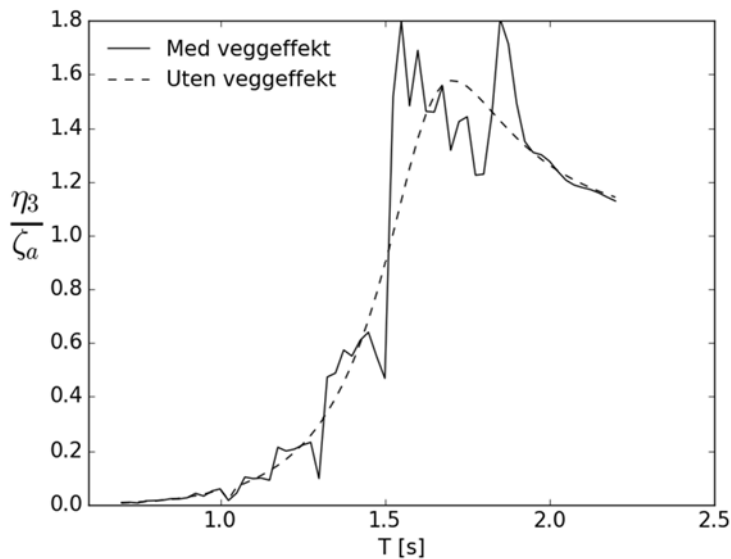
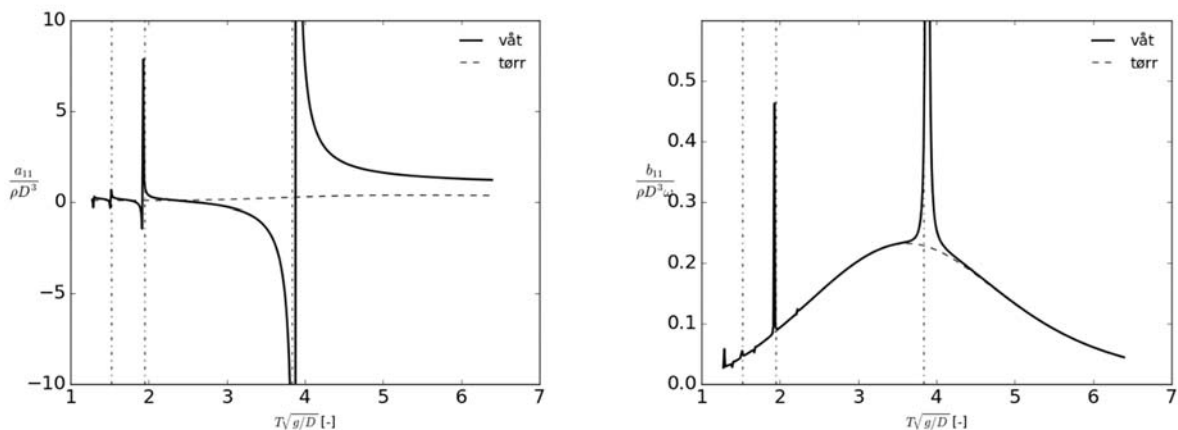


Figure 24: Beregnet effekt av bølgerefleksjon fra sidevegger i tanken på hivbevegelsen fra WAMIT. Veggeffekt er modellert med speilingsteknikk.

5.2.6 Radiasjonskrefter (tilleggsmasse og demping)

Beregnete radiasjonskrefter for modellkonfigurasjon K10 og K11 fra WAMIT er presentert i form av koeffisienter for tilleggsmasse og demping i Figure 25. Påvirkning av sloshing/intern fri overflate på dempingskoeffisienten ved egenperiodene til antisymmetriske sloshing-moder er en numerisk effekt på grunn av singularitet av det interne problemet.



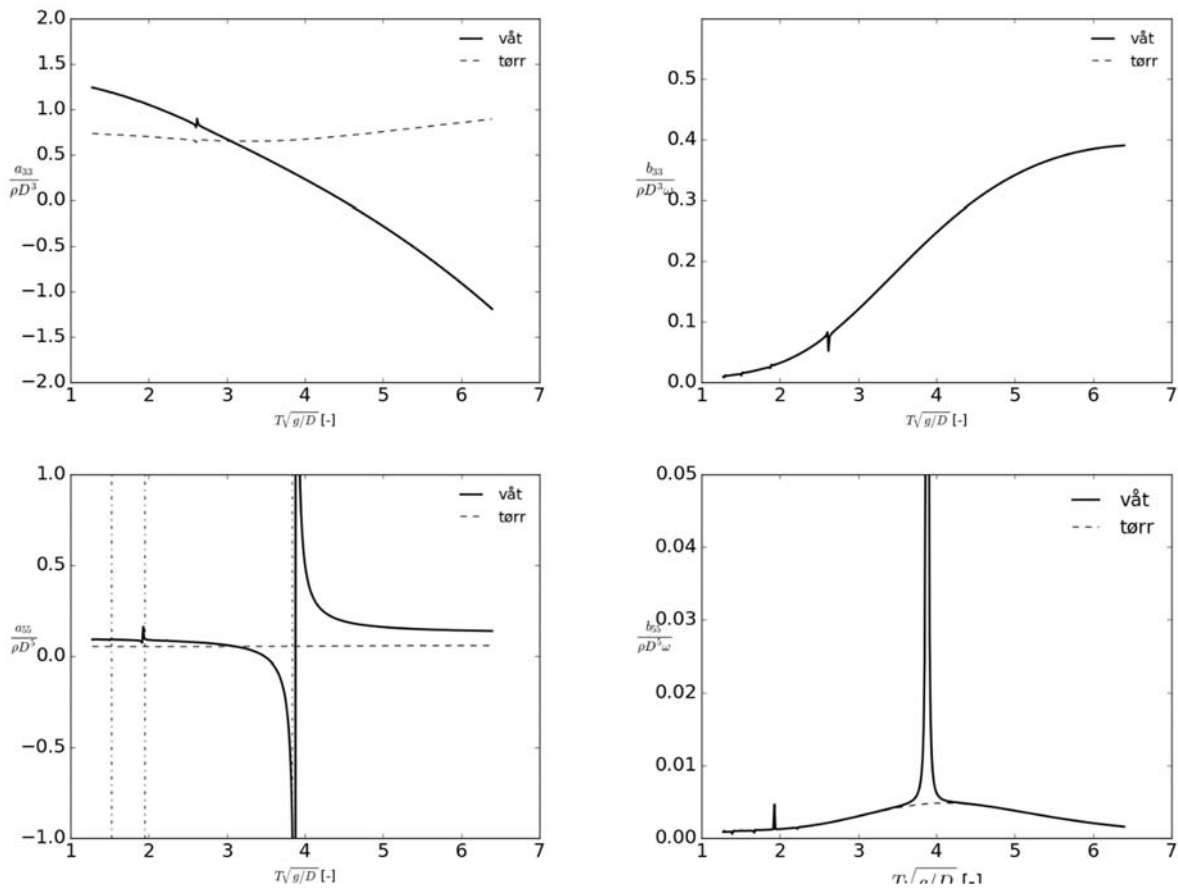


Figure 25: Koeffisienter for tilleggsmasse (høyre kolonne) og demping (venstre kolonne) i jag (øverst), hiv (midten) og stamp (nederst) for tørr og våt modellkonfigurasjon, beregnet fra WAMIT.

5.3 Fortøyningskrefter

5.3.1 Førsteordens bevegelser

Førsteordens bevegelser til merdkonstruksjonen, forårsaket av innkommende bølger, vil forårsake dynamiske krefter i fortøyningsslinene. Sammenligning av bølgeinduserte bevegelser til merdmodell med vann og uten vann viser at sloshing har stor effekt på førsteordens bevegelser i jag og i stamp. Spesielt for bølgeperioder som tilsvarer bølgelengder lik merdens diameter (rundt 1,0 s for gitte skalerte merdmodeller) er det en kraftig forsterkning av jagbevegelsen, sammenlignet med merdmodell uten vann (se Figure 9 og Figure 10). Her er det også stor spredning av målt jagrespons fra forsøk, noe som forklares med ikkelineære effekter ved sloshing. Tilsvarende oppførsel av førsteordens bevegelse i jag for bølgeperioder omkring 1,0 s ble også observert for fleksibel modell (K21), men med lavere amplituder enn for stiv modell (se Figure 18). Dette kan forklares med lavere sloshingamplituder som følge av elastiske deformasjoner til merden og dertil overføring av energi fra indre vannvolum til omgivelsene. Første sloshing mode, som kan beskrives som en halv bølgelengde over diameteren til merden (se Figure 29), fører til nær kansellering av jagbevegelsen (Figure 9). Det er viktig å designe fortøyningen med tilstrekkelig fleksibilitet til å tillate førsteordens bevegelser av merden.

5.3.2 Midlere bølgedriftskrefter

Bølgedriftskrefter er viktig å ta hensyn til ved design av fortøyning, da fortøyningen må ta opp disse kreftene for å hindre avdrift. Bølgedriftskreftene er tydelig påvirket av indre vannvolum som følge av sloshing, hvor beregnet driftkraft har lokale maksima ved egenperioder til antisymmetriske sloshing moder. Videre har driftskreftene lokale minima ved symmetriske sloshing moder. Da sloshing er et ikke-lineært fenomen, må effekten av sloshing på driftkreftene som beregnet fra WAMIT anses som kvalitative.

Generelt avviker bølgedriftskrefter i modellforsøkene fra beregnet bølgedriftskraft fra WAMIT for lavere bølgeperioder. Dette kan skyldes bølgerefleksjon fra tankvegger, eller ikke-lineære effekter knyttet til at flytekrage går inn og ut av vann. Krefter på flytekrage for relativt sett mer å si for kortere bølgeperioder.

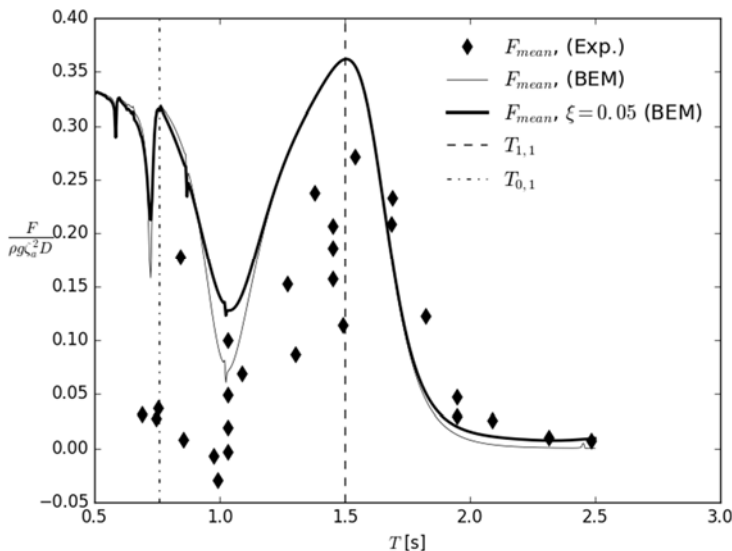


Figure 26: Midlere bølgedriftskrefter for stiv modell med vann (K11). Egenperioder til de to laveste antisymmetriske sloshing modene er angitt med stiplede linjer. Negative verdier for driftskraft observeres blant forsøksdata.

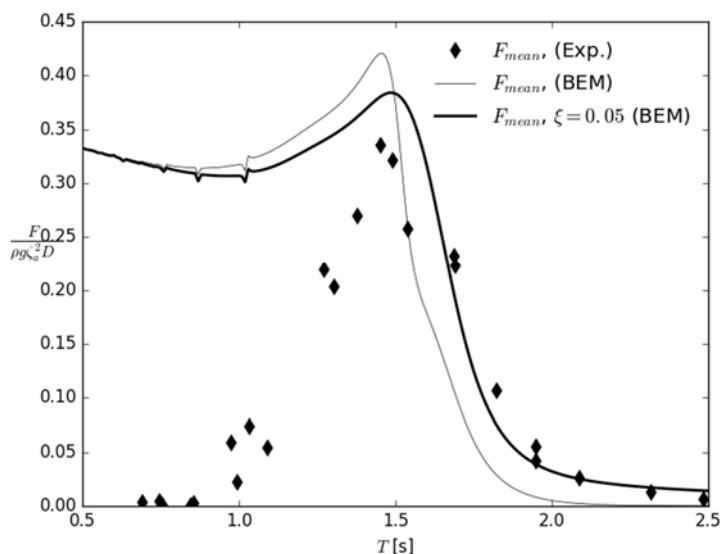


Figure 27: Midlere bølgedriftskrefter for stiv, tørr modell (K10). Resultater fra modellforsøk avviker fra WAMIT beregninger for kortere bølgeperioder.

5.3.3 Saktevarierende krefter og bevegelser

Saktevarierende krefter og bevegelser er også viktig å ta hensyn til ved design av fortøyningsystem. En fortøyd lukket merd representerer et masse- fjærsystem som kan settes i bevegelse. Stor masse kombinert med slakkfortøying medfører relativt høye egenperioder i jag. Selv om egenperioden i jag er høy vil den kunne eksiteres i en irregulær sjøtilstand. Figure 28 viser målt strekk i fremre og bakre fortøyningsline fra test med fleksibel dukmerd i en irregulær sjøtilstand. Sjøtilstanden er en realisering av et JONSWAP spekter med signifikant bølgehøyde $H_s=1,5$ m, topperperiode $T_p = 4,7$ s og med toppethetsparameter $\gamma =$

3,81. De saktevarierende kreftene har en periode på omkring 28 s i modellskala (tilsvarende i underkant av 2,5 min i fullskala) og amplituder overstiger amplituder fra førsteordens bølgebevegelser for gitt tilfelle.

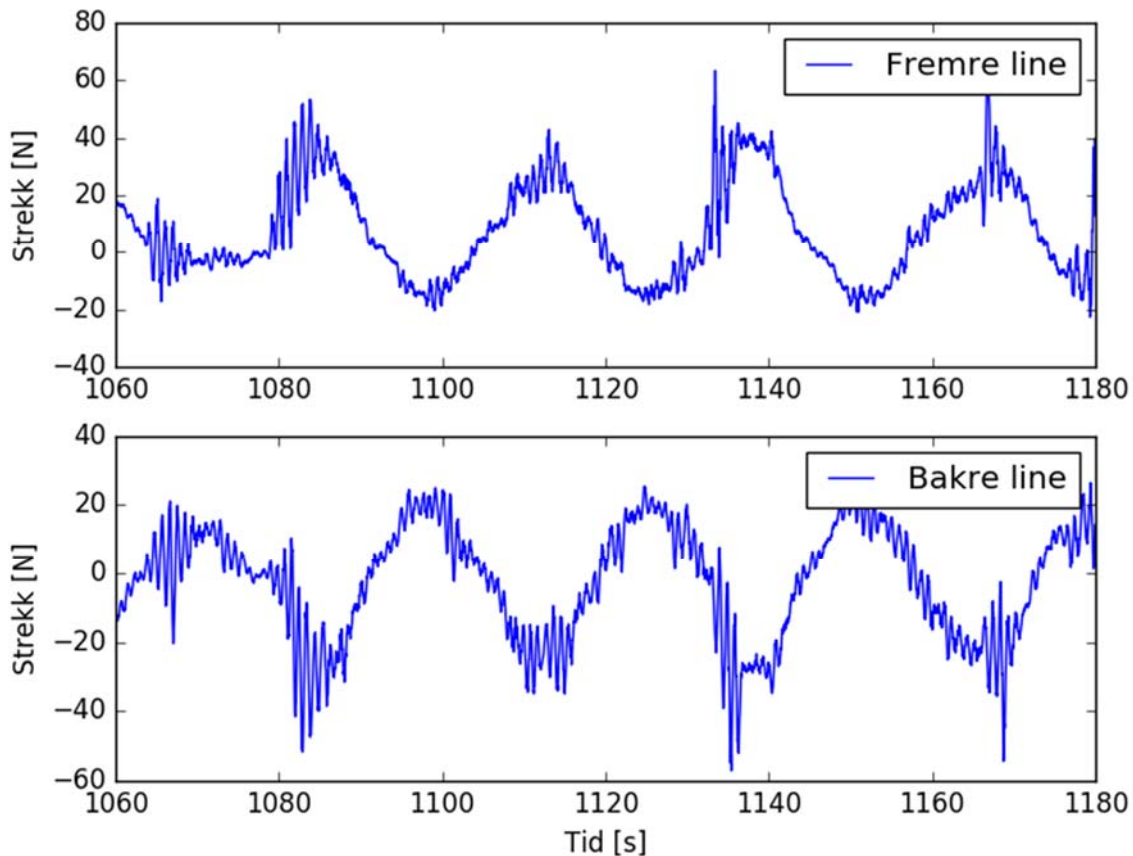


Figure 28: Saktevarierende krefter i forføyningslinjer ved test av fleksibel dukmerd i irregulær sjø. Sjøtilstand er realisering av JONSWAP spekter med $H_s=1,5$ m, $T_p=4,7$ s og $\gamma = 3,81$.

5.4 Sloshing

Et vannvolum med fri overflate i en lukket beholder kan gi store bølgebevegelser (sloshing) av inneholdt vannvolum dersom beholderen settes i bevegelse. Dette er relevant for flytende lukkede merder i sjø, hvor merden kan settes i bevegelse av bølgeforhold på lokaliteten. Sloshing avhenger av geometri til beholder/merd i forhold til bevegelse til merden, som også påvirkes av inneholdt vannvolum. For periodiske bevegelser av merden vil ulike bølgesystem settes opp avhengig av hvilken periode/frekvens bevegelsene foregår med. Slike bølgesystem, eller egenmoder, for sloshing en sirkulærsylindrisk tank er gitt fra

$$f_{m,n}(r, \theta) = J_m \left(l_{m,n} \frac{r}{R} \right) \begin{cases} \cos(m\theta) \\ \sin(m\theta) \end{cases}$$

for $m = 0, 1, 2, \dots$ og $n = 1, 2, \dots$ hvor $l_{m,n}$ er røtter til ligningen $J'_m(l_{m,n}) = 0$ (se Faltinsen og Timokha, 2009). Egenmodene til de seks høyeste egenperiodene for sloshing i en sirkulærsylindrisk tank er gitt i figuren 11.

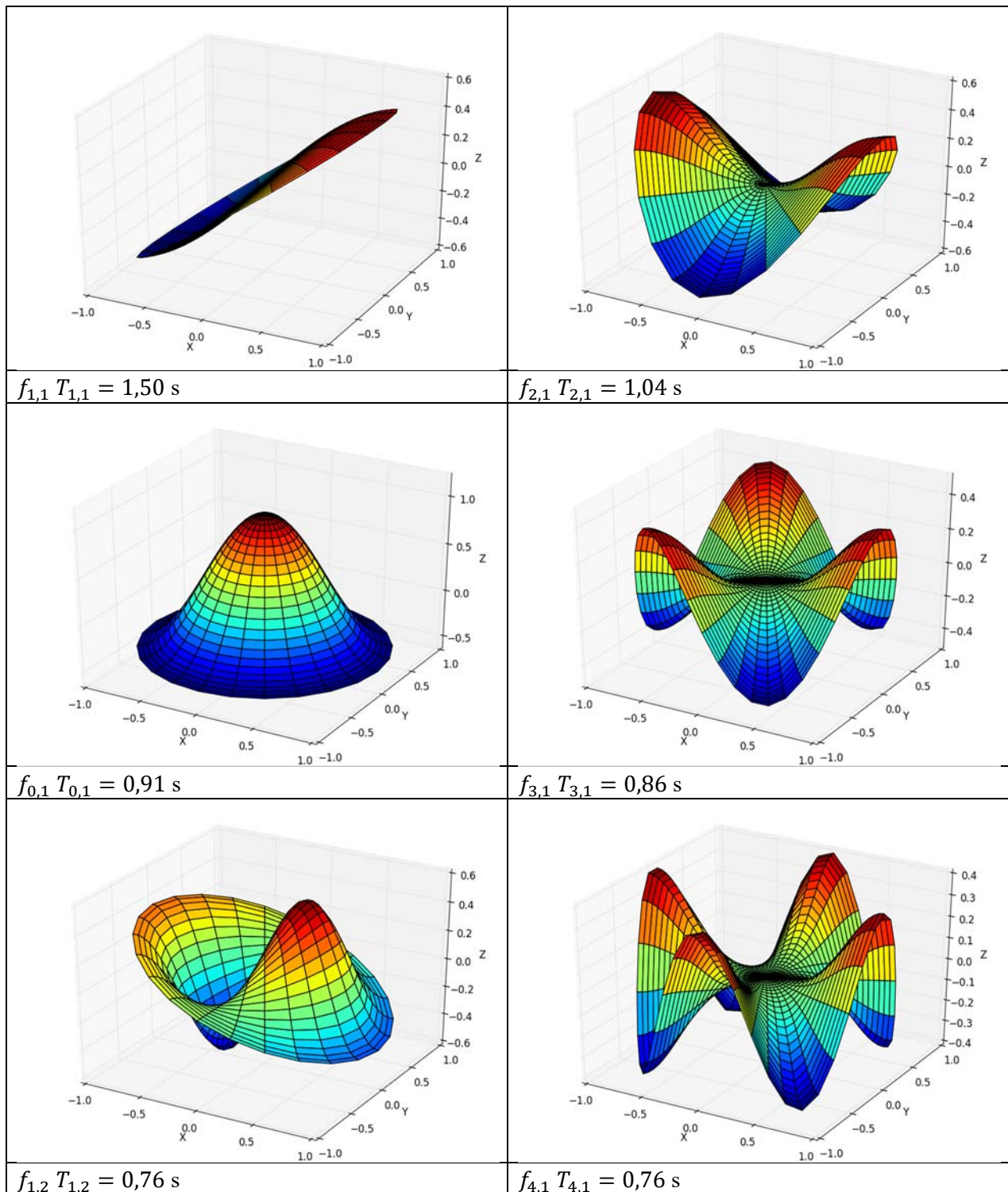


Figure 29: Egenmoder for de seks høyeste egenperiodene til sloshing i en sirkulærsylindrisk tank.

Målte sloshing amplituder i framkant og bakkant av stiv grunn modell K11 og stiv dyp modell K12, normalisert på uforstyrret innkommende bølgeamplitude, er gitt i Figure 30 og Figure 31.

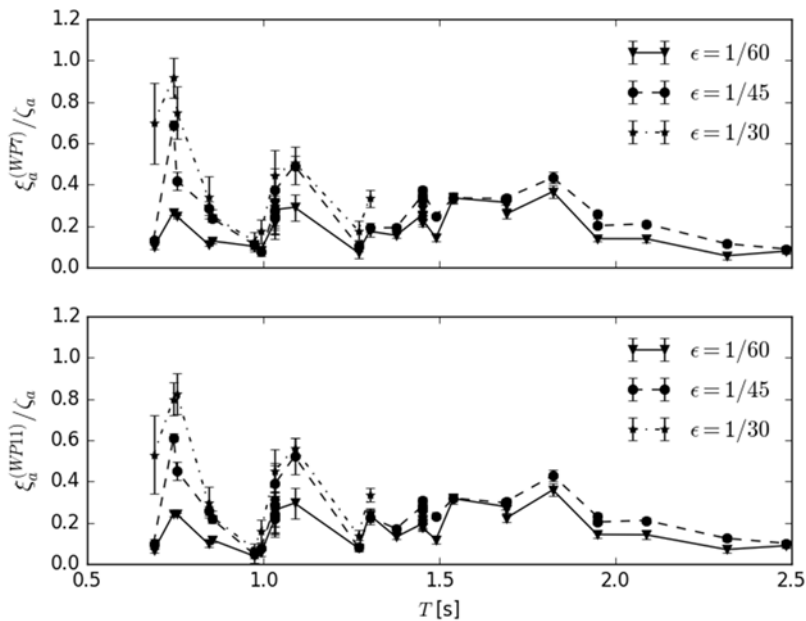


Figure 30: Interne bølgeamplituder (sloshing) på side mot bølgemaskin (WP7) og side mot strand (WP11) fra modellforsøk med stiv modell (K11) i regulære bølger. T er periode til innkommende bølge. Det er en klar effekt av bølgesteilhet for bølgeperioder omkring egenperiodene $T_{1,2} = 0,76$ s og $T_{2,1} = 1,04$ s.

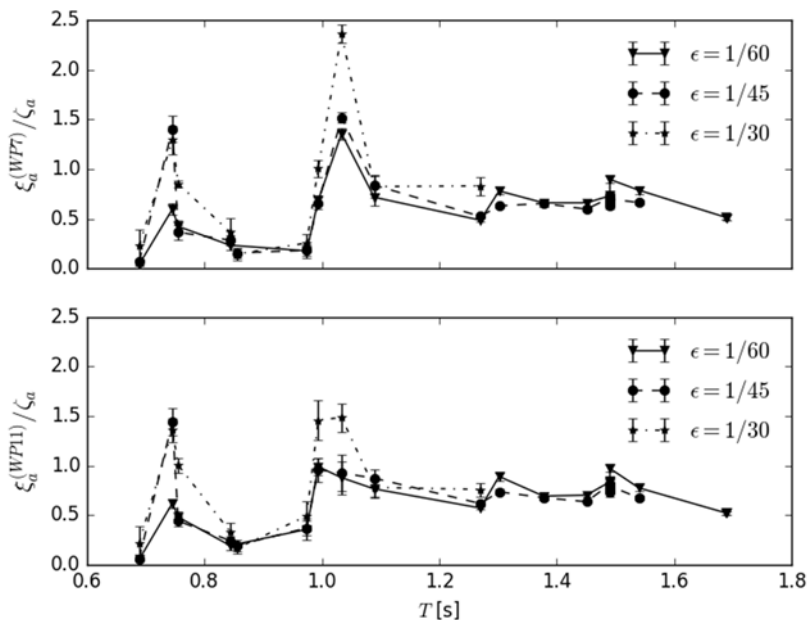


Figure 31: Interne bølgeamplituder (sloshing) på side mot bølgemaskin (WP7) og side mot strand (WP11) fra modellforsøk med stiv, dyp modell (K12) i regulære bølger. T er periode til innkommende bølge. Det er en klar effekt av bølgesteilhet for bølgeperioder omkring egenperiodene $T_{1,2} = 0,76$ s og $T_{2,1} = 1,04$ s.

Egenperioder for sloshing i en stiv sfærisk tank med vilkårlig fyllingsgrad er gitt av McIver (1988). Egenperioder for en halvfull kuletank er gjengitt i Tabell 9. Hvordan fleksibiliteten i en dukbasert merd påvirker egenperiodene er ikke kjent.

Tabell 9: Egenperioder for sloshing i en (stiv) halvkule er gitt basert på publiserte numeriske data fra McIver (1988).

T_{ij} [s]	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$
$i = 0$	0,898	0,658	0,545	0,476
$i = 1$	1,391	0,756	0,596	0,508
$i = 2$	1,035	0,673	0,551	0,479
$i = 3$	0,869	0,615	0,516	0,455

5.5 Elastiske deformasjoner

Store elastiske deformasjoner ble observert under testing av elastisk modell K21 i bølger. Elastisiteten til modellen ble vurdert å være relevant for typiske lukkede merder av GRP-type.

Elastisiteten ble dokumentert ved påsetting av statisk last F og måling av radiell deformasjon Δx , som vist i figuren under. Lasten ble påført ved hjelp av et strammebånd festet på tvers av modellen. Påført kraft ble målt med kraftmåler.

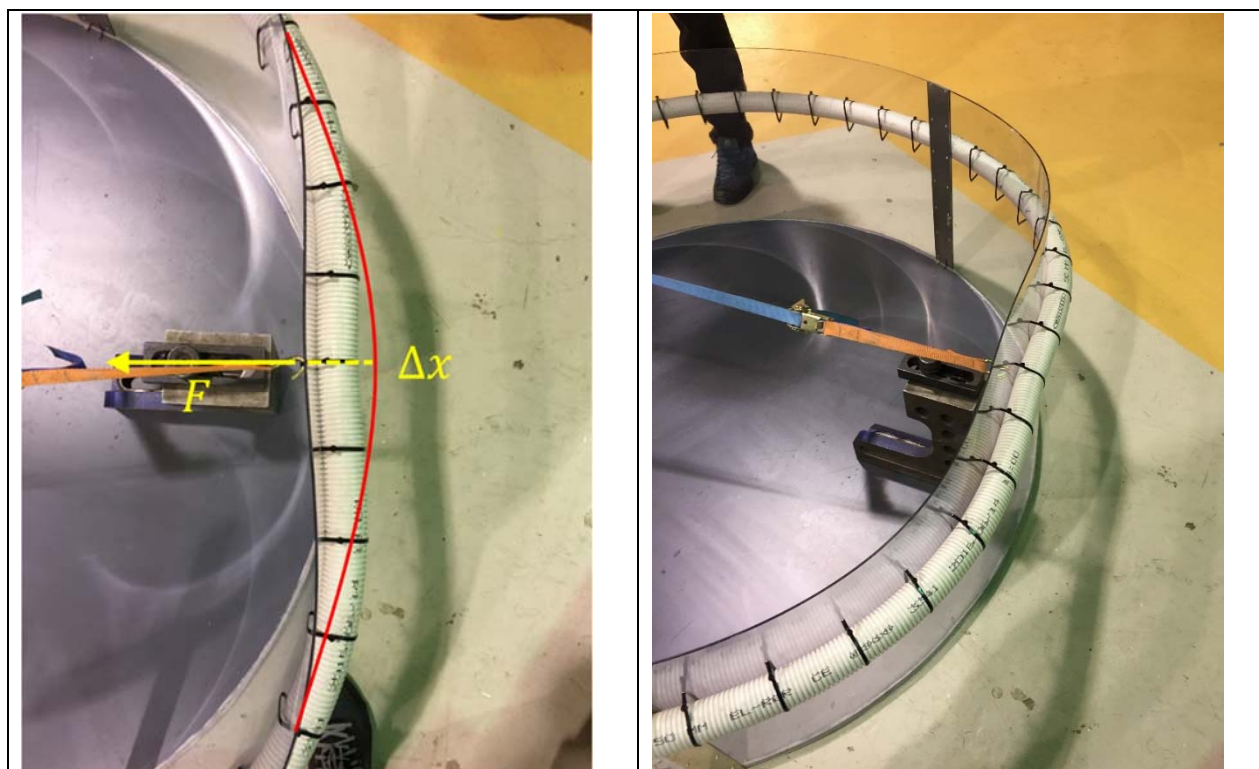


Figure 32: Dokumentasjon av elastisitet til modellkonfigurasjon K21 ved påføring av statisk last og måling av radiell utbøyning.

Table 10: Dokumentasjon av veggstivhet til elastisk merdmodell (K21). F er påsatt kraft, og Δx er målt radiell utbøyning av sidevegg.

F [N]	Δx [mm]
0	0
38,7	7
55,4	10
69,7	16
89,8	25

Elastisk deformasjon av modellen i regulære bølger er beregnet som radiell forskyvning ϵ av posisjonsmarkører relativt til stivt legeme-bevegelsene til merden. For markør nummer i med faktisk posisjon x_i , så får vi

$$\epsilon = \|x_i - x_0\| - R$$

hvor x_0 er posisjon til senteraksens kryssing av markørplanet og R er radius av merden. Elastiske deformasjoner normalisert på høyde av uforstyrret innkommende bølge for tester med elastisk modell (K21) i regulære bølger, er gitt i figuren under.

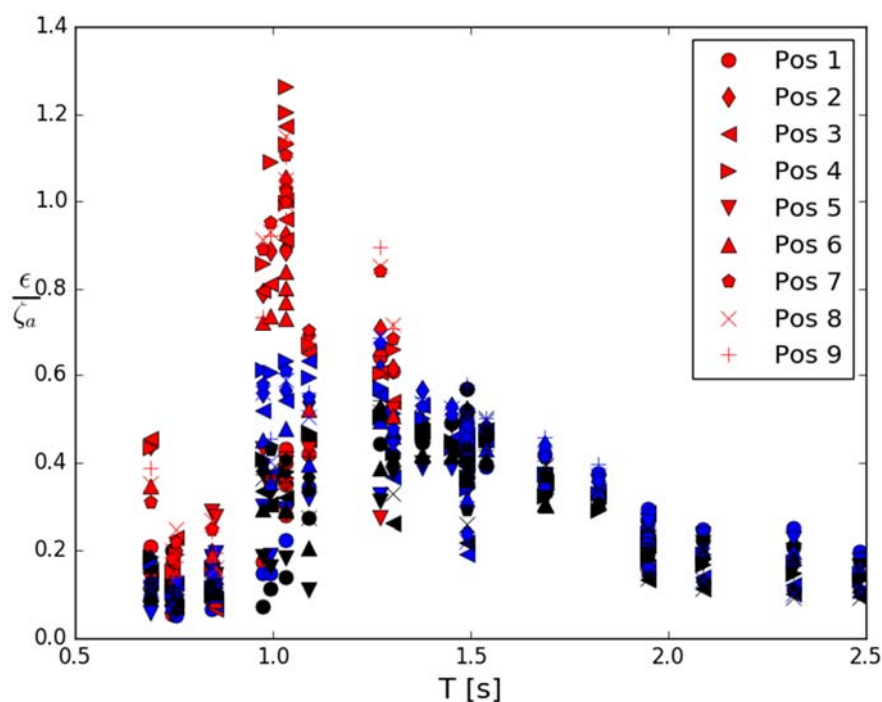


Figure 33: Elastiske deformasjonsamplituder for 9 posisjonsmarkører fra tester med elastisk modell (K21) i regulære bølger. Farge på markører angir bølgesteilhet (rød=1/30, blå=1/45 og svart=1/60). Deformasjonsamplitudene er normalisert på innkommende bølgeamplitude.

En tydelig forsterkning av elastiske deformasjonsamplituder kan sees omkring bølgeperiode 1,0 s. Dette sammenfaller med egenperiode for sloshing hvor også store jag-bevegelser ble observert.

6 Effekt av tetthetsforskjell ved skade

6.1 Tetthetsforskjeller

På fjordlokaliteter hvor lukkede merder typisk blir installert, kan det under spesielle forhold oppstå sjiktning hvor øverste del av vannsøylen karakteriseres av et brakkvannslag med lavere salinitet og dermed lavere tetthet enn sjøvann. Dersom vannet i merden pumpes opp fra dyp som ligger under sprangsjiktet, vil man få tyngre vann inne i merden enn omkringliggende vann i brakkvannslaget. For fleksible dukbaserte merder kan slike tetthetsforskjeller føre til lekkasje fra posen dersom en skade oppstår med hull i posen. Dersom lekkasjen overskrider tilførsel av vann i merden fra vannutskiftningsystemet, vil posen kunne dreneres.

6.2 Drenering av posemerd

Dreneringsprosess for en fleksibel posemerd ble studert ved enkle modellforsøk i skala 1:37,5, hvor en kuleformet posemerd ble fylt med vann med høyere tetthet enn omkringliggende vannvolum. Diameter til merdmodellen var 0,76 m. En sirkulær åpning med diameter 2 cm ble påført posens bunnpunkt. Åpningen ble tildekket av en lapp ved påfylling av vann i posen, og forsøket ble startet ved at lappen ble fjernet. På grunn av tetthetsforskjell mellom vannet i merden og vannet utenfor oppsto da en strøm av vann ut fra posen gjennom åpningen. Dette medførte at posens geometri ble endret etter hvert som vannvolumet i posen ble redusert.

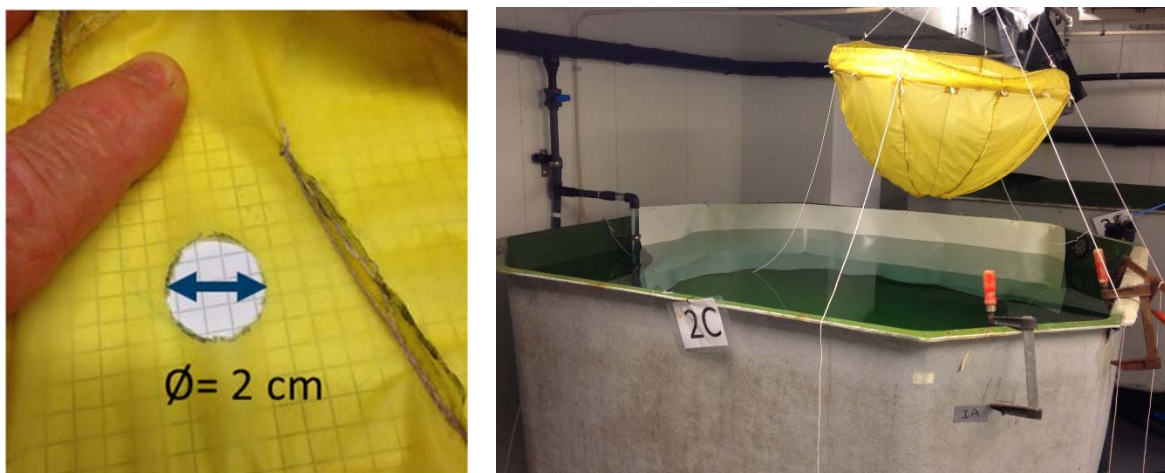


Figure 34: Åpning i bunn av posemerd (venstre bilde). Modell av posemerd opphengt over kar for testing av drenering. Modellen ble senket ned i karet før påfylling av vann og fløt fritt ved forsøkene.

Table 11: Målte verdier av salinitet og temperatur av vann fra dreneringsforsøk. Opprinnelig vannvolum i merdmodell V_0 , tetthetsforskjell $\Delta\rho$ og målt dreneringstid T_{drain} .

Test nr.	Eksternt vannvolum (vann i kar)			Internt vannvolum (vann i merd)			V_0 [m ³]	$\Delta\rho$ [kg/m ³]	T_{drain} [min]
	S_A [ppt]	T_0 [°C]	σ_t [kg/m ³]	S_A [ppt]	T_0 [°C]	σ_t [kg/m ³]			
8	33,97	8,8	26,49	42,92	11,3	32,98	0,115	6,49	66
9	34,07	8,8	26,57	39,40	10,2	30,42	0,112	3,85	88
10	33,91	8,8	26,44	39,46	12,3	30,09	0,111	3,64	93
12	34,30	8,8	26,70	35,92	11,7	27,52	0,111	0,824	280
13	34,19	9,0	26,51	42,85	10,9	33,12	0,111	6,61	68
14	34,23	8,9	26,70	42,85	11,7	32,93	0,111	6,23	67

En matematisk modell av dreneringsprosessen ble utviklet, hvor en posemerd ble modellert ved bruk av endelige elements metode (FEM). Potensialteori ble brukt for å estimere dreneringshastighet ved gitte tetthetsforskjeller og plassering av skade. Bernoulli's ligning gir følgende uttrykk for dreneringshastighet under hydrostatiske forhold og uniform tetthet ρ_1 inne i merden og ρ_0 utenfor merden:

$$w = \sqrt{\frac{2gh(\rho_1 - \rho_0) + 2\rho_1g\delta}{\rho_1 - \alpha^2\rho_0}}$$

Hvor h er vertikal posisjon til skaden i forhold til vannplanet, g er tyngdeakselerasjonen, δ er internt vannnivå relativt til ytre stillevannsnivå og α er medrivningskonstanten som er ca. lik 0,03 for en aksesymmetrisk jet. Dreneringsraten Q for en åpning med areal A er dermed

$$Q = CAw$$

Her er C utslippskoeffisienten, som kan deles inn i en kontraksjonskoeffisient C_c fra potensialteori og en viskøs korreksjonsfaktor C_v , slik at

$$C = C_c C_v$$

Kontraksjonskoeffisienten for en aksesymmetrisk veggjet er $C_c = 0,586$. Viskøs korreksjonsfaktor avhenger av Reynoldstall, men vil for relevante scenarier være tilnærmet lik 1,0 i fullskala.

Dreneringsprosessen er en koblet prosess som avhenger av trykkforskjell inne i og utenfor posen (intern vannstand δ) kombinert med posens evne til å deformere seg. Simulering av dreneringsprosessen viser at dreneringshastigheten avtar raskt etter oppstart av dreneringsprosessen. Dette forklares med at dreneringen reduserer indre vannstand, noe som også reduserer indre overtrykk og dermed drivkraften til lekkasjen.

Tidsforløp av deformasjoner til posemerd under dreneringsprosessen er gitt i Figure 35. Tidlig deteksjon av lekkasje er vi

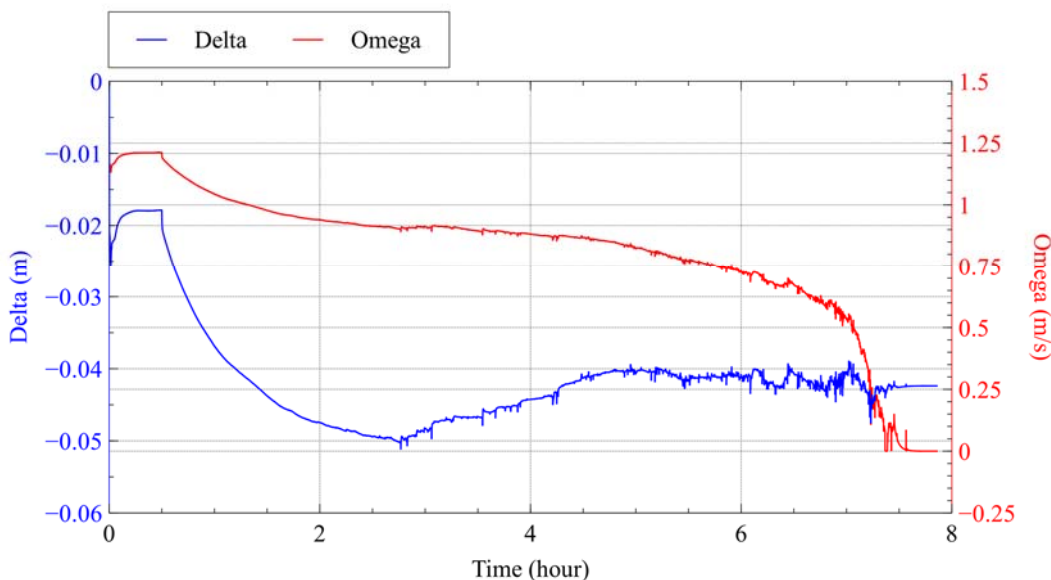


Figure 35: Tidshistorie til intern vannstand δ og dreneringshastighet w (omega) fra simulering av dreneringsprosess ved tetthetsforskjell $\Delta\rho = 6,5 \text{ kg/m}^3$.

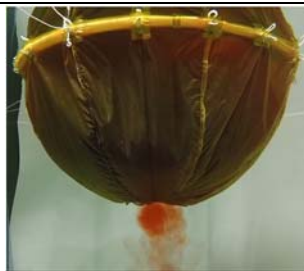
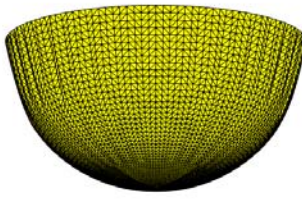

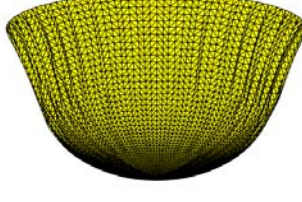


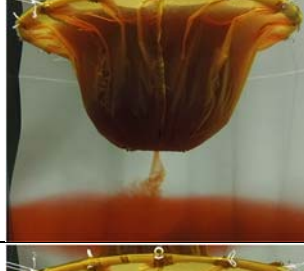

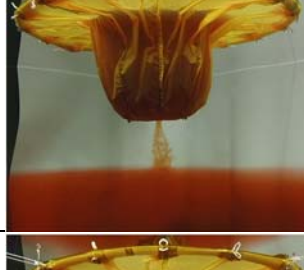
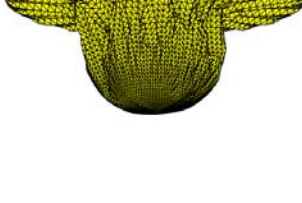

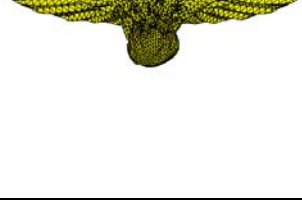
0 min (0 timer)			0 timer Volum: 100 %
8 min (0,8 timer)			0,8 timer Volum: 86 %
16 min (1,6 timer)			1,7 timer Volum: 74 %
34 min (3,4 timer)			3,5 timer Volum: 48 %
51 min (5,2 timer)			5,3 timer Volum: 24 %
66 min (6,7 timer)			6,9 timer Volum: 9 %

Figure 36: Sammenligning av deformasjon av pose fra modellforsøk og simulering av dreneringsprosess. Tetthetsforskjell er $6,5 \text{ kg/m}^3$. Tidspunkt etter oppstart for bilder fra modellforsøk er gitt i modellskala og (fullskala).

7 Konklusjon

Dette prosjektet har søkt å belyse sjøegenskaper og aspekter knyttet til fortøyning av flytende lukkede oppdrettsanlegg. En kategorisering av lukkede merder i sjø har blitt definert basert på merdens fleksible egenskaper, hvor man skiller mellom stiv merd, elastisk merd og fleksibel dukmerd. Hydrodynamisk oppførsel til generiske merdkonstruksjoner for de tre nevnte hovedkategorier av lukkede merder har blitt studert gjennom skalerte modellforsøk og numeriske beregninger. I forsøkene ble modellene testet i regulære bølger så vel om i irregulær sjø. Respons i regulære bølger viser at sloshing av indre vannvolum har stor betydning for bevegelse i jag og stamp. Spesielt er det observert en forsterkning av jagbevegelsen for bølgeperioder nær andre egenperiode for sloshing. Dette er bølgeperioder som kan være relevante for fjordlokaliteter og som derfor bør vurderes i design og dimensjonering av lukket merd og tilhørende fortøyning. Tester med elastisk merdmodell viser også relativt store elastiske deformasjoner i dette området, noe som betyr at utmatting kan være relevant. Bølgerespons av fleksibel posemerd følger lignende hovedtrender som de øvrige merdmodellene. Forsterkning av jagresponsen er observert for bølgeperioder tilsvarende bølgelengder ca. lik merdens diameter. Saktevarierende bevegelser viste seg å være en betydelig komponent av fortøyningskreftene til fleksibel posemerd i irregulær sjø.

Studie av effekt av tetthetsforskjeller av vann ved skade på fleksibel posemerd, viser at drenering av posen kan inntreffe. Dette kan være kritisk dersom lekkasjen ikke stoppes eller kompenseres på annet vis, da volumreduksjon kan skape høy effektiv fisketetthet i posen. System for vannutskiftning kan brukes aktivt til å motvirke slik lekkasje inntil skaden er reparert. Dette forutsetter at lekkasje detekteres. Studiet viser at lekkasje først vises som reduksjon av indre vann-nivå.

8 Referanseliste

- [1] Rosten, Ulgenes, Henriksen, Terjesen, Biering, Winther, 2011. "Oppdrett av laks og ørret i lukkede anlegg – forprosjekt". Rapport nr. A21169. SINTEF.
- [2] McIver, 1988. "Sloshing frequencies for cylindrical and spherical containers filled to an arbitrary depth". *J. Fluid Mech.* Vol. 201, pp. 243-257.
- [3] Faltinsen og Timokha, 2009. "*Sloshing*". Cambridge University Press.
- [4] Zhao, Faltinsen, Krokstad og Aanesland, 1988. "Wave-current interaction effects on large-volume structures". In: T. Moan, N. Janby and O. Faltinsen, Editors, *Proc. 5th Int. Conf. Behaviours of Offshore Structures (Boss '88)*, 2.

9 Hovedfunn

Følgende hovedfunn er oppnådd i prosjektet:

- Indre vannvolum med fri overflate har stor betydning for bølgeinduserte bevegelser av lukkede merder i jag og stamp. Dette forklares med sloshing, som er store bevegelser av internt vannvolum forårsaket av bølgeinduserte bevegelser av merden i sjø.
- Effekt av vannvolum gir kraftig forsterkning av jagbevegelser for bølgeperioder tilsvarende bølger med lengde lik merddiameter, som er viktig å studere ved design og dimensjonering av fortøyning til lukkede merder.
- Elastisitet av merdkonstruksjonen ser ut til å redusere store jagbevegelsen ved sloshing. Dette forklares med overføring av energi fra indre vannvolum til omgivelsene på grunn av elastiske merddeformasjoner.
- Saktevarierende krefter og bevegelser er viktig for belastning i fortøyningslinjer og kan overgå dynamisk last fra førsteordens bevegelser. Dette ble observert for fleksibel posemerd
- Tetthetsforskjeller mellom vann i merden og omgivelsene kan føre til drenering av fleksibel posemerd ved skade. I operasjonelle tilfeller kan system for vannutskiftning i merd brukes til å motvirke dreneringsprosessen inntil lekkasjen er stoppet. Dette forutsetter at lekkasjen detekteres. Simuleringer viser at lekkasje kan detekteres som plutselig endring av indre vannstand.

10 Leveranser

Leveranse	Dato	Beskrivelse
L1	15.02.2017	Populærvitenskapelig publikasjon/presentasjon med konseptkategorisering ved TEKSET 2017
L2	31.10.2017	Vitenskapelig publikasjon: " <i>Numerical and experimental study on the drainage and collapse of a floating flexible bag structure</i> ". Innsendt manuskript under vurdering for publikasjon i Journal of Fluids and Structures.
L3	12.01.2018	Vitenskapelig publikasjon: " <i>Numerical and experimental study on the seakeeping behavior of floating closed rigid fish cages</i> ". Innsendt manuscript under vurdering for presentasjon på konferansen OMAE2018, og publisering i <i>Proceedings from OMAE2018</i> .
L4	17.03.2017	Arbeidsmøte 1 med hands-on laboratorieforsøk
L5	04.12.2017	Arbeidsmøte 2 med hands-on laboratorieforsøk
L6	15.02.2018	Faglig sluttrapport
L7	15.02.2018	Administrativ sluttrapport