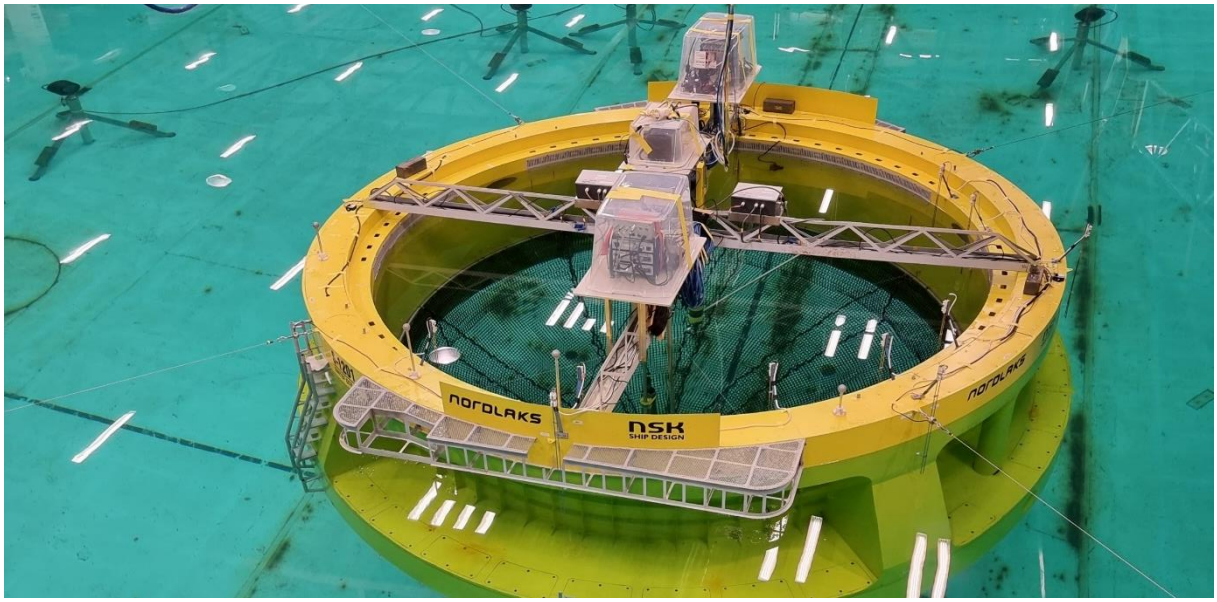


Sammendrag av hovedelementer i modelltest

Nordlaks Hydra

Document nr: 5552-150-101

Rev.	Description	Date/Sign	Controlled	Approved
A	Issued for Owner comments	19.04.2022/HÅ	BB	
A1	Review	12.09.2022/HÅ	BB	
0	Issued	19.09.2022/HÅ	BB	TT

Referring to convention of Paris, March 20, 1983, for the "Protection of Industrial Property", we emphasise that technical drawings, models, specifications, etc. belong to the designing firm and cannot be made public, copied or otherwise used without the written consent from NSK Ship Design.

Innholdsfortegnelse

1 Introduksjon 3

2 CFD analyse 4

3 Modellforsøk 5

3.1 Mål og hensikt med modellforsøk 5
3.2 Hydro-modell 5
3.2.1 Lab 5
3.2.2 Modellbygging 5
3.2.3 Instrumentering 10
3.3 Vindtunnel-modell 12

4 Resultater 14

4.1 Bevegelse 14
4.2 Interne bølger 17
4.3 Strømlaster 20
4.4 Bølgelaster og bølge/strømlaster 21
4.5 Interne strømninger 22
4.6 Vindlaster 25

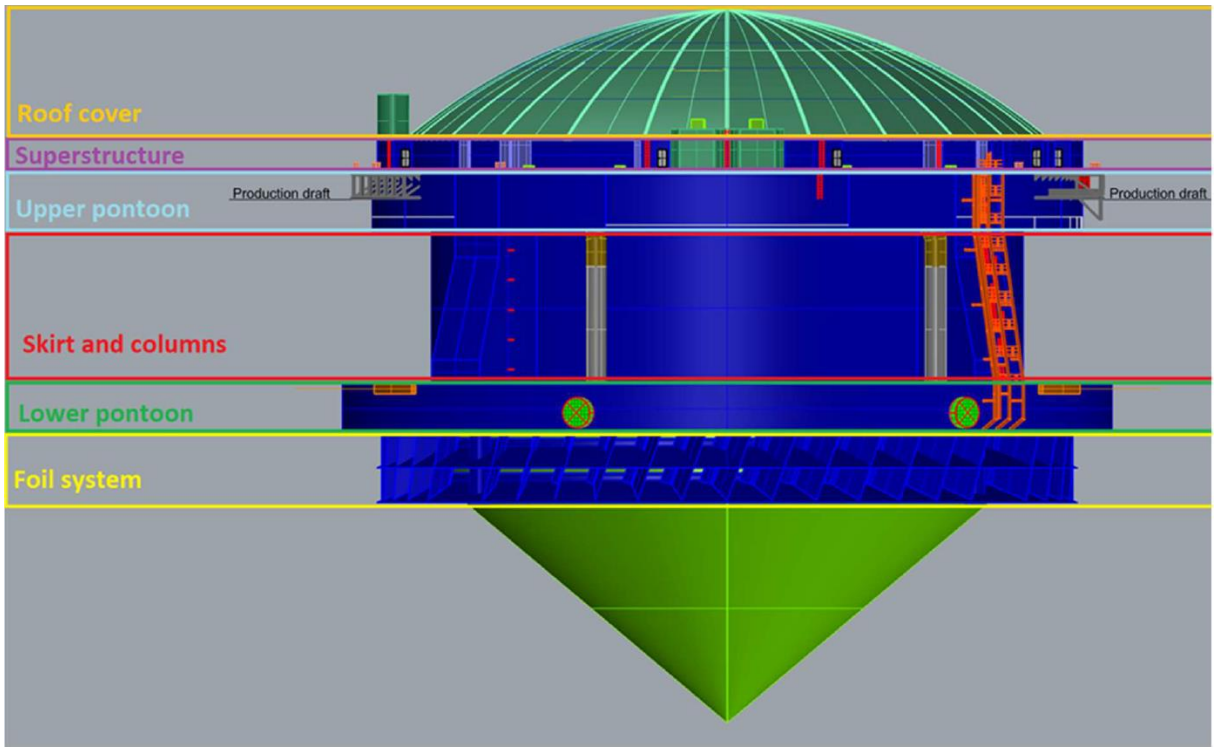
1 Introduksjon

Hydra er en alt-i-ett fiskeoppdrettsanlegg for arealeffektiv produksjon på lokasjon med høy strømfart. Nøkkelfaktorer er:

- Sekundærbarriere eller stålbarriere for å unngå fiskerømning og beskyttelse mot predatorer
- Høy fisketetthet for høyere arealeffektivitet i produksjon
- Utnyttelse av naturlig innkommende strømning på lokasjon til å indusere strøm i tanken samt bytte ut vann i produksjonsvolumet
- Helt lukket ned til ca. 20 m dyp for å unngå lus og sykdom

Hydra har fått tilsagn om fire utviklingstillatelser fra Fiskeridirektoratet, tilsvarende en maksimal total biomasse (MTB) på 3120 tonn. Prosjektet antar en tetthet på i underkant av 40 kg/m3, altså et minimum produksjonsvolum på 86 700 m3.

Hydra består av hoveddeler som vist i Figur 1.



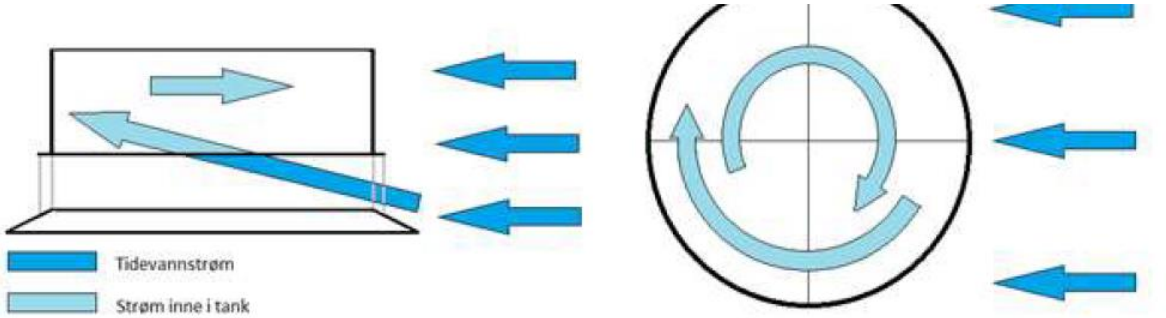
Figur 1. Hydra med navn på hoveddeler.

Dette dokumentet, 5552-150-101 Sammendrag av hovedelementer fra modelltesten, oppsummerer de hydrodynamiske analysene og modellforsøkene av Hydra og sammenligner resultatene.

2 CFD analyse

I november 2017 ble det utført et sett med CFD analyser for å vurdere intern strømning, og drag-koeffisienter. Det ble brukt to ulike strømhastigheter og 4 variasjoner av foil-geometri ble vurdert. Basert på resultat fra denne studien ble en spesifikk foil-geometri valgt. Den samme foil-geometrien er bevart igjennom prosjektet og er testet i modellforsøk.

De fire ulike geometriene av foilseksjonen ble vurdert i 25 cm/s og 50 cm/s. Geometri-variasjonene hadde ulike vinkler på horisontal og vertikal del av foilene i foilstrukturen.



Figur 2. Forenklet illustrasjon av antatt strøm inne i Hydra-tanken i forkant av CFD analyse. Foil skal sette opp en skråstilt virvel inne i tanken.

Det er i analysen definert et kontrollvolum for å studere sannsynlig vannbevegelse inne i Hydra. CFD analysene oppgir et estimat på gjennomsnittstid for vannutskifting fra en kontinuerlig, homogen innkommende strøm ved å anta en konstant gjennomsnittlig strømhastighet inne i kontrollvolumet. Kontrollvolumet (hele tanken) vil ha store lokale variasjoner i hastighet, så denne metoden er best egnet til å sammenligne effekten av ulike geometrier.

Postprosessering av CFD-analysene er nyttige for å skaffe et bilde av strømningsforholdene inne i tanken. Det vil bare gi øyeblikksbilder, men kan være med på å skape større forståelse av hvordan vannet beveger seg i tanken.

Resultater fra CFD analyser kan sammenlignes med resultat fra modellforsøk for å sannsynliggjøre at tanken og foilen fungerer som antatt under tilsvarende forutsetninger.

3 Modellforsøk

3.1 Mål og hensikt med modellforsøk

Mål og hensikt med modellforsøkene for Hydra er:

- Verifikasjon av hydrodynamiske krefter fra sjø og vind på konstruksjonen under gitte værforhold/-fenomen og gitte lastekondisjoner
- Verifikasjon av konseptet, hvor alle forventede kondisjoner og fenomener er tatt høyde for
- Verifikasjon og kalibrering av CFD-analyser mot eksperimentelle målinger fra modellforsøkene
- Kalibrering av laster på forankringsliner
- Undersøke og beskrive intern strømning i tanken så langt det lar seg gjøre
- Studere interne bølger og effekt av bølgedemper

3.2 Hydro-modell

3.2.1 Lab

En skalert modell av Hydra er testet hos Sintef Ocean sine fasiliteter. Det er utført tester i Havbassenget og i Slepetanken. I Havbassenget utføres bølgetester for en teoretisk bredspektret bølgekondisjon (Pink Noise-spektrum, Hs=1.0m) og en dimensjonerende spesifikk miljøkondisjon (Hs=2.5m, Tp=5.9 s). Bølger med og uten lav og høy strøm kombineres for å gi relevant data. Modellen er spent ut i et horisontalt fortøyningssystem med 4 liner. Ved deballastering fra produksjonsdypgang til vedlikeholdsdypgang fjernes vekter fra modellen til en får rett dypgang. Modellen er forhåndskalibrert for begge dypganger for å få korrekt skalert vekt, tyngdepunkt og treghetsmoment.

I Slepetanken spennes modellen ut i 4 liner med stor stivhet. Hydra slepes av vognen i Slepetanken mens den relevante hastigheten og motstand på Hydra logges fra laster på forankringslinene.

3.2.2 Modellbygging

For tester i Havbasseng og Slepetanken bygges en detaljert modell i skala 1:20 av Hydra. Overbygg og tak neglisjeres da dette ikke har innvirkning på hydrodynamisk respons fra bølger og strøm. Vekt og massetreghet av tak er tatt med i skalert modell. Noen forenklinger gjøres ifm. bygging av modell, men i all hovedsak, og for alle hydrodynamiske relevante aspekt, er den geometrisk korrekt skalert. Det brukes standard (geometrisk) Froude-skalering, bortsett fra på not.

Figur 3. Modellbygging.

3.2.2.1 Struktur

Pongtonger, søyler, og skjørt er bygd som en stiv struktur. Rammen er satt sammen av stålplater fylt med hard fyllmasse av plastskummaterialer som er forhåndsskjært i henhold til Hydras geometriske dimensjoner. Modellen er belagt med plastpolstring, grunnet, slipt, og malt til glatte overflater.

Figur 4. Modellbygging - stålramme og fylling av hardt plastskummateriale.

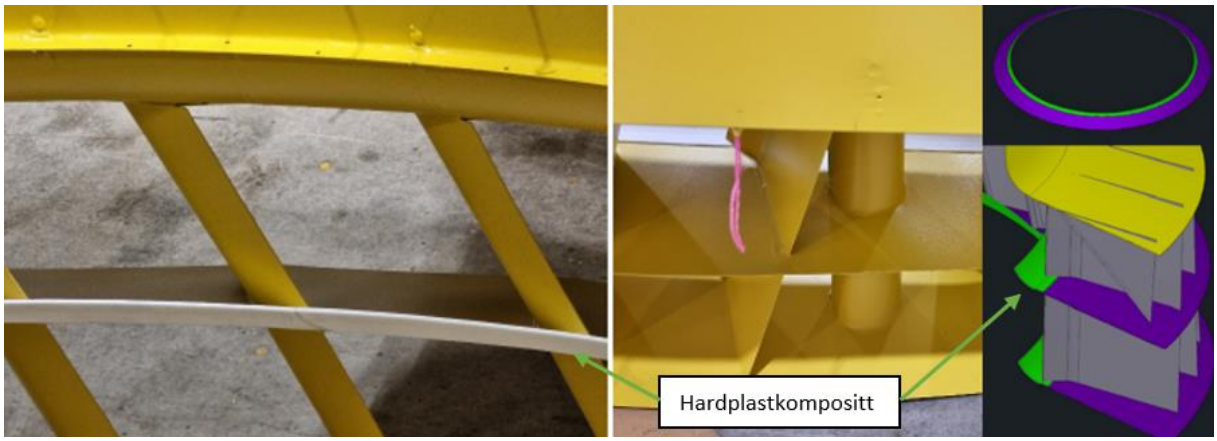
Modellen har ballast av faste lodd på topp- og bunnpongtong, og i søylene. Ved ballastering plasseres lodd i lommer på modellen hvor det ellers ligger hard fyllmasse. Se Figur 5.

Figur 5. Lomme for ballasteringslodd i bunnpongtong.

3.2.2.2 Foil

Modellen er laget med foilseksjon under bunnpongtongen som er designet for å indusere sirkulasjon og vannutskiftning i tanken fra ekstern strøm. Foilseksjonen er utformet som en stiv struktur bestående av vertikale «vinger» i stål som er jevnt fordelt under modellen. De horisontale kjeglene er delvis stål og delvis 3D-printet i hardplastkompositt, ref. Figur 7. Hardplastkompositt limes til stålkonstruksjonen. Foilseksjonen har også fire vertikale søyler gjennom foilseksjonen for å kunne bære konstruksjonens egenvekt utav vann. Disse er plassert slik at de skal ha minst mulig påvirkning på strømning.

Figur 6. Foilseksjon under bygging.

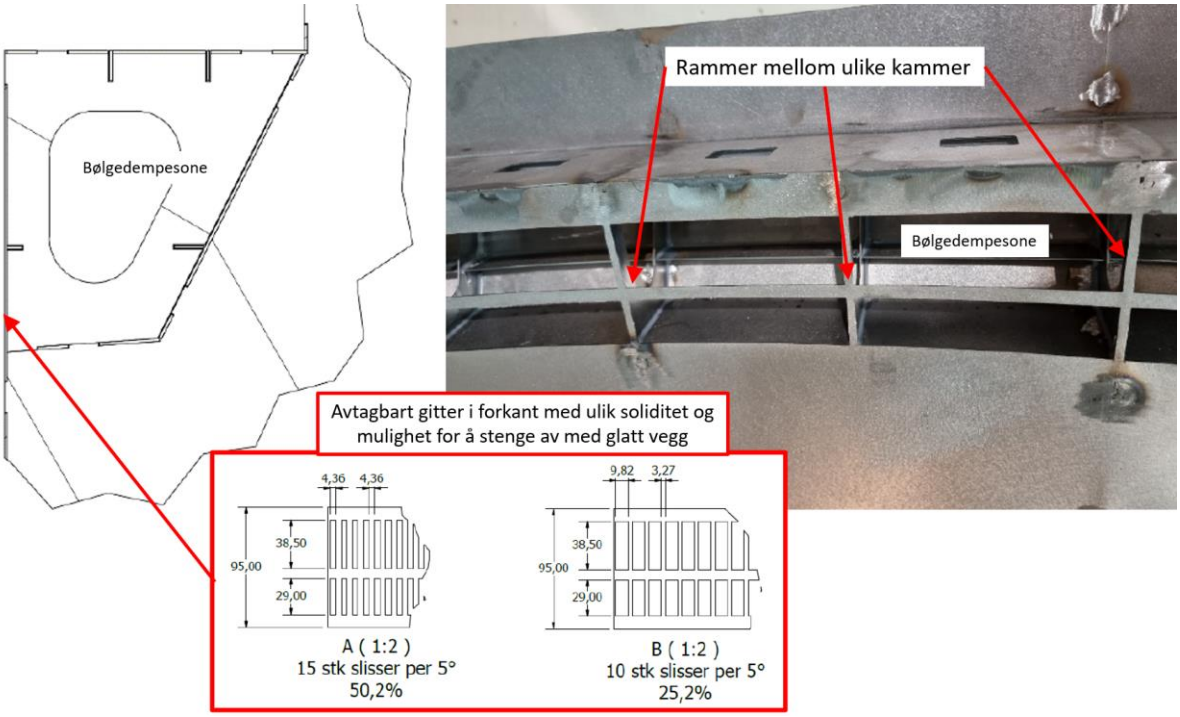


Figur 7. Venstre: 3D-printet kant (hvit). Midten: Søyle gjennom foilseksjon. Høyre: Sammenslåing av 3D-printet- (grønn) og stålmateriale.

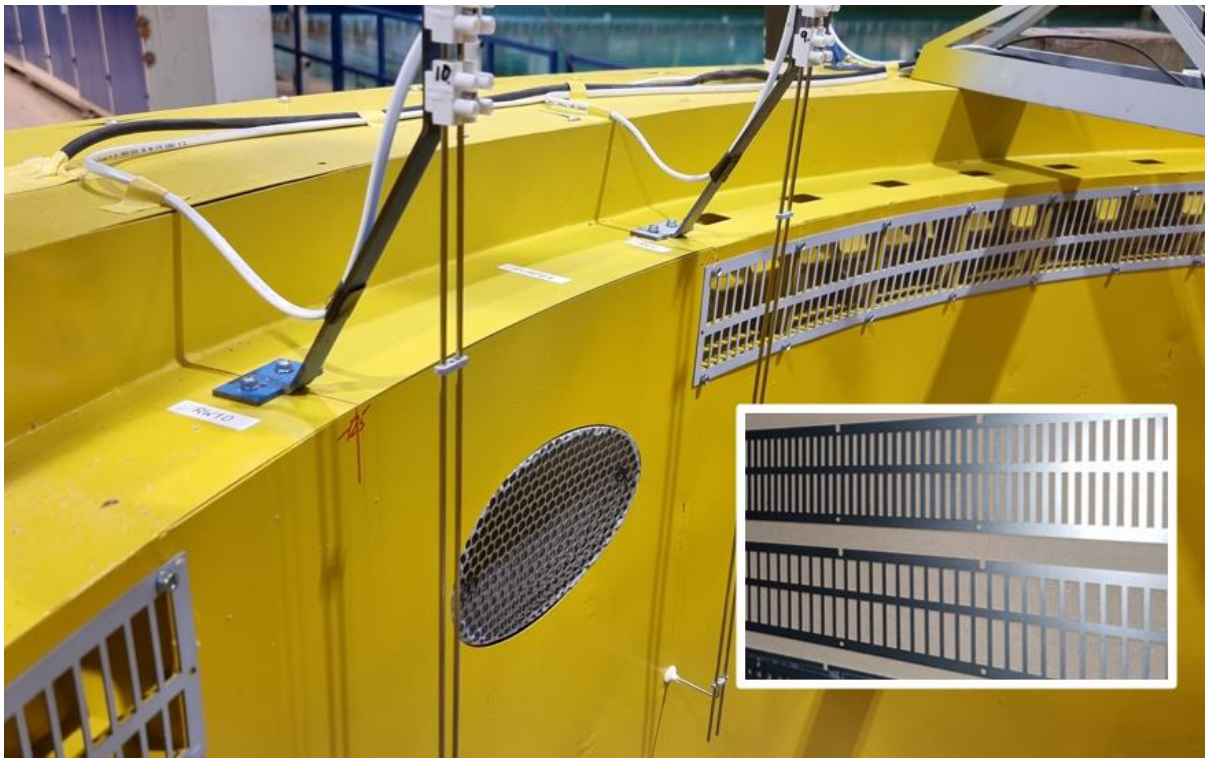
3.2.2.3 Dempestruktur

Intern bølgeheving med stor amplitude pga. resonansfenomen (særlig sloshing) var tidlig en utfordring som ble vurdert som potensielt problematisk. En bølgedempesone ble implementert i designet og utformet for å fungere så bra som mulig, selv om en måtte inngå flere kompromiss for å ivareta andre forutsetninger. Det innebar å ta hensyn til fiskevelferd (riktig soliditet på gitter i forkant, unngå skarpe kanter ut mot produksjonsvolum), vaskbarhet, strukturell kontinuitet, og at volumet er gir best mulig demping samtidig som det er tilpasset arrangement i øvre pongtong. For

både fiskevelferd, vaskbarhet, struktur og arrangement vil det beste være å kunne unngå bruk av bølgedemping. Men dette ville bare være mulig om resulterende intern bølgeheving var liten nok uten bølgedempingsstruktur. Derfor ble det også testet med lukket bølgedempingssone.



Figur 8. Bølgedempesone. Design og bygging.



Figur 9. Dempestruktur og vanninjeksjonsinnløp.

3.2.2.4 Not

Hydra skal ha dobbel not, og modellen er bygd med dobbel not. Ren geometrisk skalering av not vil gi notemateriale med svært liten trådtykkelse og lave Reynoldstall, som igjen vil gi høye drag koeffisienter. Dette vil gi utfordringer ifm. validering og kalibrering av numeriske modeller. Målet er da å treffe på tilsvarende drag-koeffisienter i modelltest som forventet i fullskala. Selv med disse tiltakene kommer Reynoldstall i modellforsøk ned til mellom 50 og 500. Fullskala not i polyetylen skalert ned i størrelse vil gi stor bøyemotstand, så nylon-not med lavere bøyestivhet er et bedre valg. Laster antas da bare å være avhengige av soliditet.

Soliditet (Sn) kan estimeres på bakgrunn av trådtykkelse (d) og halvmaske (stolpelengde, l_{st}). Ulike estimat kan brukes og vil gi ulike estimat på soliditet. For å estimere korrekt soliditet anbefales bruk av digital bildebehandling.

Under er eksempel gitt på at ulike metoder gir ulik soliditet.

Tabell 1 Ulike formler for estimering av soliditet. "Løland" er oppgitt brukt i Lølands arbeid (Løland, 1991, p135) basert på Rudi et al (1988) sine modellforsøk. "Uten knute" representerer et estimat av soliditet på not uten noe økt diameter pga knuter. "Liten knute" tar hensyn til en mindre økning I lokal diameter pga knytting av tråden til notpanel.

Løland (stor knute)	Uten knute	Liten knute
$Sn = \frac{2d}{l_{st}} + \frac{1}{2}\left(\frac{d}{l_{st}}\right)^2$	$Sn = \frac{2d}{l_{st}} - \left(\frac{d}{l_{st}}\right)^2$	$Sn = \frac{2d}{l_{st}}$

Tabell 2 Oversikt over fullskala not og modellskala not (samme not brukt på produksjonsnot og sekundærnot i modellforsøk) med ulike estimat og metoder for å oppgi soliditet. Bildebehandling og estimat av not ble gjort både med tørr og våt not uten at det ble observert noen forskjell i resultat.

			Soliditet (ref. Tabell 1)			
	Trådtykkelse	**Halvmaske**	**Leverandør**	**Løland**	**Uten knute**	**Liten Knute**
Produksjonsnot	2.1 mm	19.5 mm	21.5%	22.1%	20.4%	21.5%
Sekundærnot	2.6 mm	22.0 mm	21.0 %	24.3%	22.2%	23.6%
			Bildebehandling			
Modellforsøknot	2.6 mm	19.0 mm	**27.0%**	28.3%	25.5%	27.4%

3.2.2.5 Vanninjeksjon

Vanninjeksjonssystemet ble laget tilsvarende fullskala, med volumstrøm skalert geometrisk (Froude-skalering). Vannpumper ble kalibrert mot motorkontroller (RPM) ved å måle hvor land tid en brukte for å fylle et gitt volum. Tester på ulike prosentandel vanninjeksjon er altså prosent av total volumstrøm. Fullskala vanninjeksjonskapasitet (100%) er 4x37.500 m3/h.

3.2.3 Instrumentering

3.2.3.1 Måleutstyr

Måleutstyr og instrumentering ble installert for å dokumentere bevegelse, last på forankring, bølger, og ytre og indre strøm. Alt ble kalibrert, logget og prosessert av Sintef.

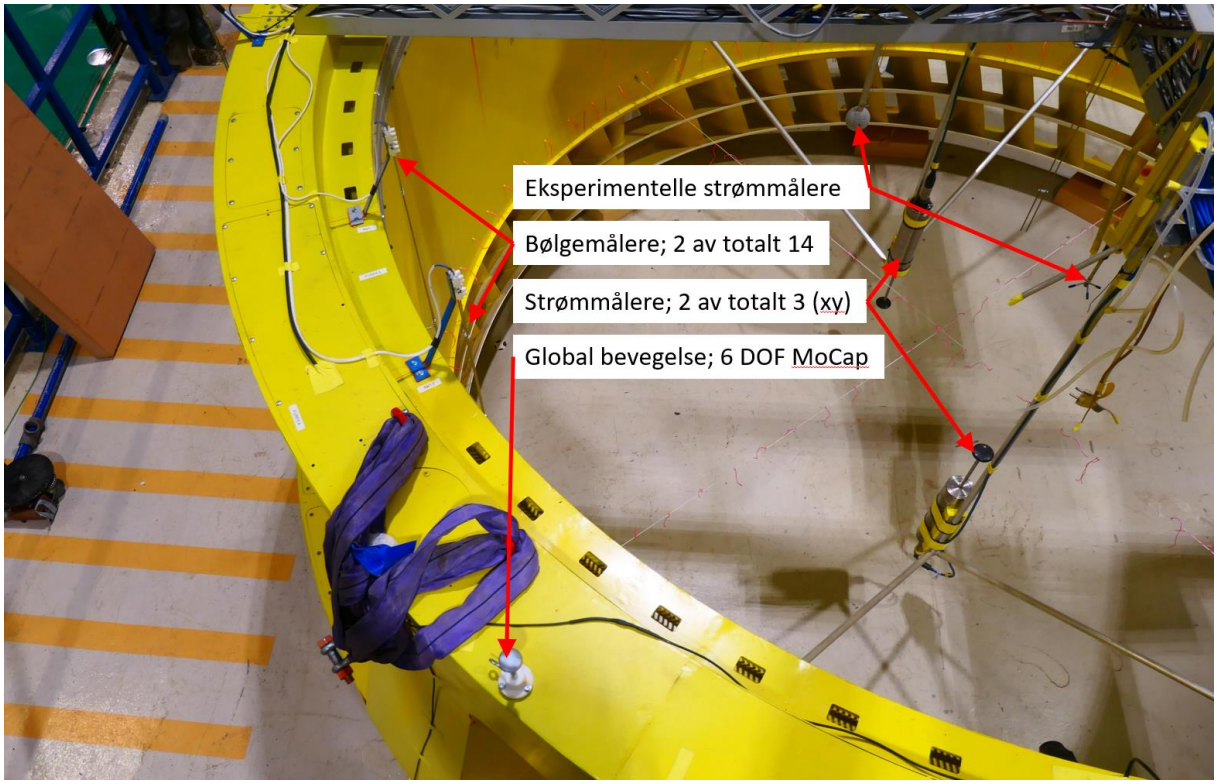
Global bevegelse av flyter fra «MoCap» data i seks frihetsgrader. I tillegg ble notspiss uavhengig logget (under vann) i tre frihetsgrader (hiv, jag og svai). Akselerasjon ble målt av fire akselerometer på flyter. 11 bølgemålere ble montert inni flyter, og tre ble montert på flyter på utsiden av tanken. To av de 14 bølgemålerene ble også flyttet ned for å logge data på vedlikeholdsdypgang («Maintenence Draft»). Last fra de fire forankringslinene ble i alle forsøk logget av lastceller. Turtall på elektromotor som driver vanninjeksjon ble logget. Denne var kalibrert og relatert til gjennomstrømningsmengde.

3.2.3.2 Utstyr for å måle og visualisere strøm

Logging og dokumentering av strøm var veldig viktig for prosjektet, men det var også utfordrende. Prosjektet krever målinger på lavere strømhastigheter enn det de fleste kommersielt brukte målere er utviklet for. I tillegg er det for eksempel vanskelig å gjøre profilerende målinger (som er vanlig ifm. lokalitetsundersøkelser) pga. at vannet i laboratoriet må være så rent som mulig. Det blir da for rent til å gjøre akustisk profilerende målinger.

Inne i selve Hydra ble strøm målt på tre steder i x- og y-retning (horisontalplanet) med elektromagnetiske målere. Selve instrumentene er ganske store, og har noen begrensninger mtp. plassering og hva de kan logge. Det er imidlertid en av få metoder der en kan få loggbar data fra innvendig strøm. Erfaringsmessig er det dessverre begrenset nytte fra denne type målinger med mindre det er forventet jevn og stabil strømning rundt målerne.

Siden visuell og loggbar informasjon om strøm inne i Hydra var viktig ble det spent ut et trådkors med små, lette trådbiter. Dette er en tilpassing av en vanlig metode for å visualisere strømningsretning på for eksempel skrog i modellforsøk. Ved å observere endring og retning på trådbitene ville en kunne visualisere strømningen inne i tanken. Forsøk med ved lave strømhastigheter er her av interesse, så det ble valgt trådbiter med lav tykkelse og lav stivhet for best mulig kunne indikere endring retning. Det ble også festet trådbiter rundt periferien av underkant av nedre pongtong for å kunne indikere strømretning inn/ut av foil-seksjon.



Figur 10 Instrumentering.

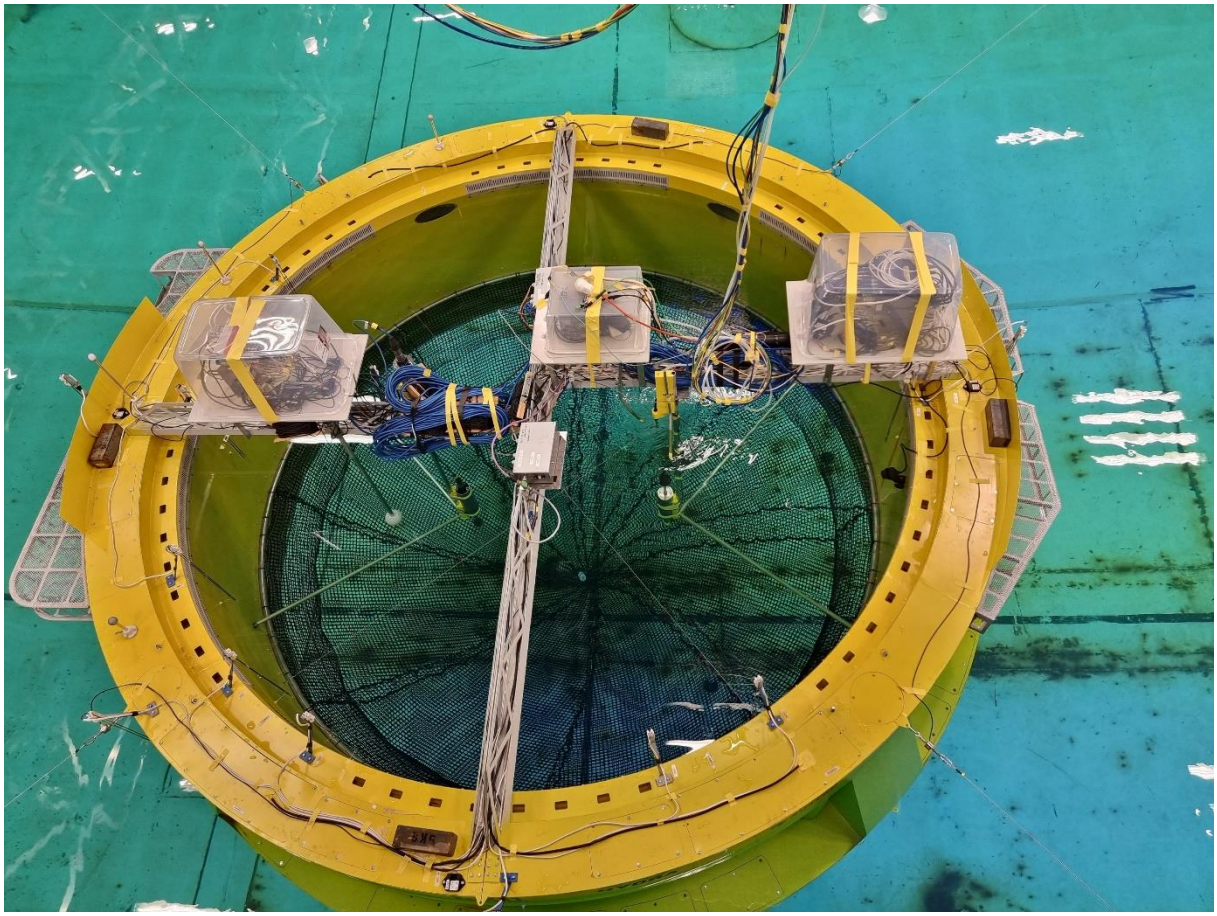
Figur 11 Trådkors og trådbiter i periferien av tanken ved innløp av foil.

I tillegg ble Hydra instrumentert med to typer eksperimentelle strømmålere som Sintef ikke enda hadde godkjent for kommersielle forsøk. Dette var strømmålere som kunne gi mer detaljert informasjon om strømbildet inne i tanken, men der vi og Sintef var usikre på om de var egnet og kom til å kunne gi nøyaktig nok resultat ved så lave strømhastigheter som i dette prosjektet. Dette illustrerer noe av utfordringen ved å måle intern strøm kvalitativt i et laboratorium.

Den ene eksperimentelle måleren er formet som en ball og har kjent dragkoeffisient. Ballen er utstyrt med en lastcelle, og den målte lasten kan omgjøres til strømhastighet som dekomponeres i tre dimensjoner (x-, y-, og z-retning). Den andre eksperimentelle måleren er en akustisk måler som måler hastighet i tre dimensjoner et lite volum. På grunn av at det er rent vann i laboratoriet, ble det

i noen utvalgte forsøkt tilsatt små oppdriftsnøytrale glasskuler inni Hydra for å reflektere signal fra den akustiske måleren.

Under slepeforsøkene i slepetanken ble det tilsatt små flytende isoporflak på overflaten av vannet. Dette ga god visualisering og god indikasjon på overflatestrøm - også ved lave hastigheter. Dette var ikke praktisk mulig i havbassenget grunnet fare for forurensing av systemet. Generelt ønsker en så rent vann som mulig mtp. visuelle observasjoner.



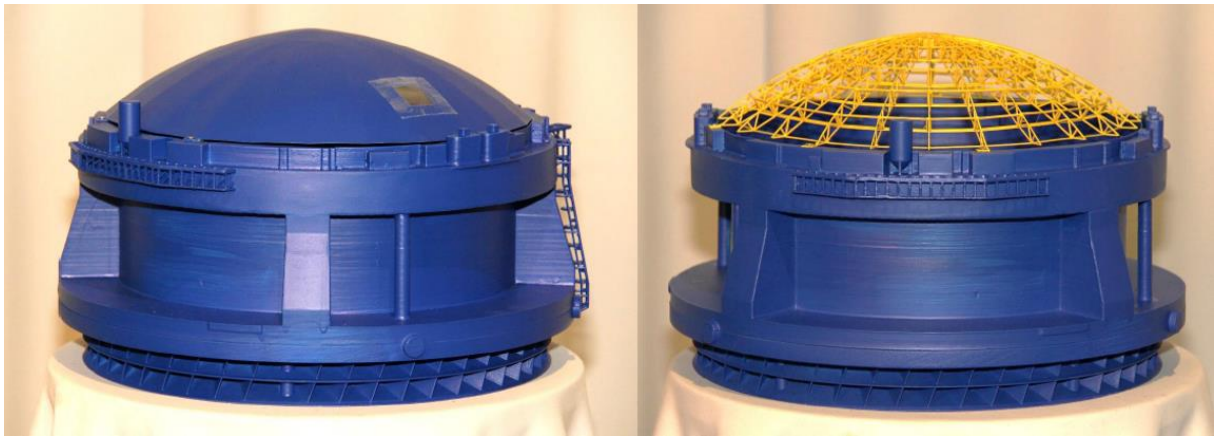
Figur 12 Komplett modell klar for forsøk i Havbassenget.

3.3 Vindtunnel-modell

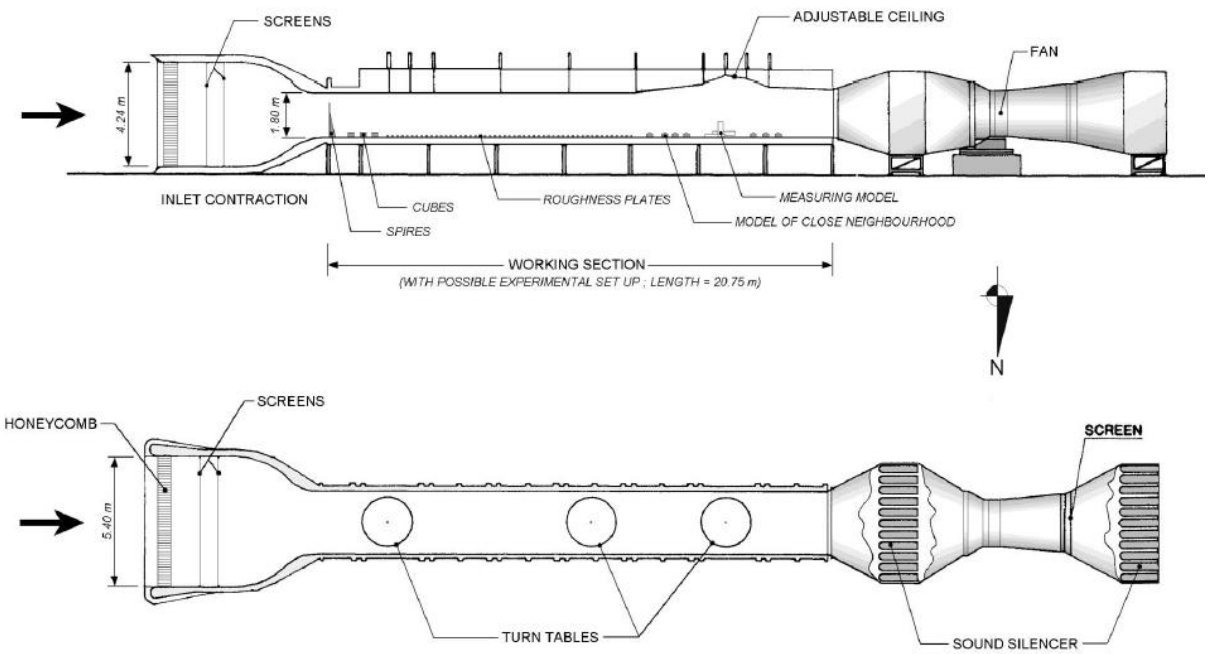
Vindtunneltest ble utført i en vindtunnel i skala 1:200 (utført av FORCE Technology, Division for Maritime Industry (DMI)). Det er sjekket for 3 geometrier; med tak, uten tak (med takstoler), og med tak men med åpen takluke. Det ble sjekket laster for 3 ulike dypganger; Produksjonsdypgang, Vedlikeholdsdypgang og hele konstruksjonen ut av vannet. Sistnevnte er relevant ifm. Transport.

Modellen er 3D-printet og identisk med designmodeller med noen forenklinger. Forenklingene (som for eksempel å ikke modellere utvendig struktur på skjørtet, rekkverk eller nøyaktig kaistruktur) er vurdert til å ha liten eller ingen påvirkning på resultat. Detaljeringsgraden er basert på metodikk og etablerte metoder som vindtunnelen bruker på tilsvarende prosjekt i tilsvarende skala.

Laster på konstruksjonen ble logget med utstyr i vindtunnelen.



Figur 13 Modell brukt i vindtunneltester. Med tak og uten tak (med takstoler). Luke i tak kan også ses på venstre bilde.



Figur 14 Vindtunnel fremstilling. Fra FORCE Technology, Division for Maritime Industry (DMI).

4 Resultater

Generelt gjennomgås modelltestresultater for å sammenligne (verifisere) resultat fra numeriske analyser brukt i strukturberegninger, forankringslaster og hydrodynamiske analyser. Ved behov justeres koeffisienter og andre parametere i analyseprogramvaren for å få tilsvarende resultat som fra modelltestene. Det utarbeides en korrelasjonsrapport, og denne sammen med modelltestrapporten og rapporter fra de ulike disipliner gjennomgås av uavhengig tredjepart.

4.1 Bevegelse

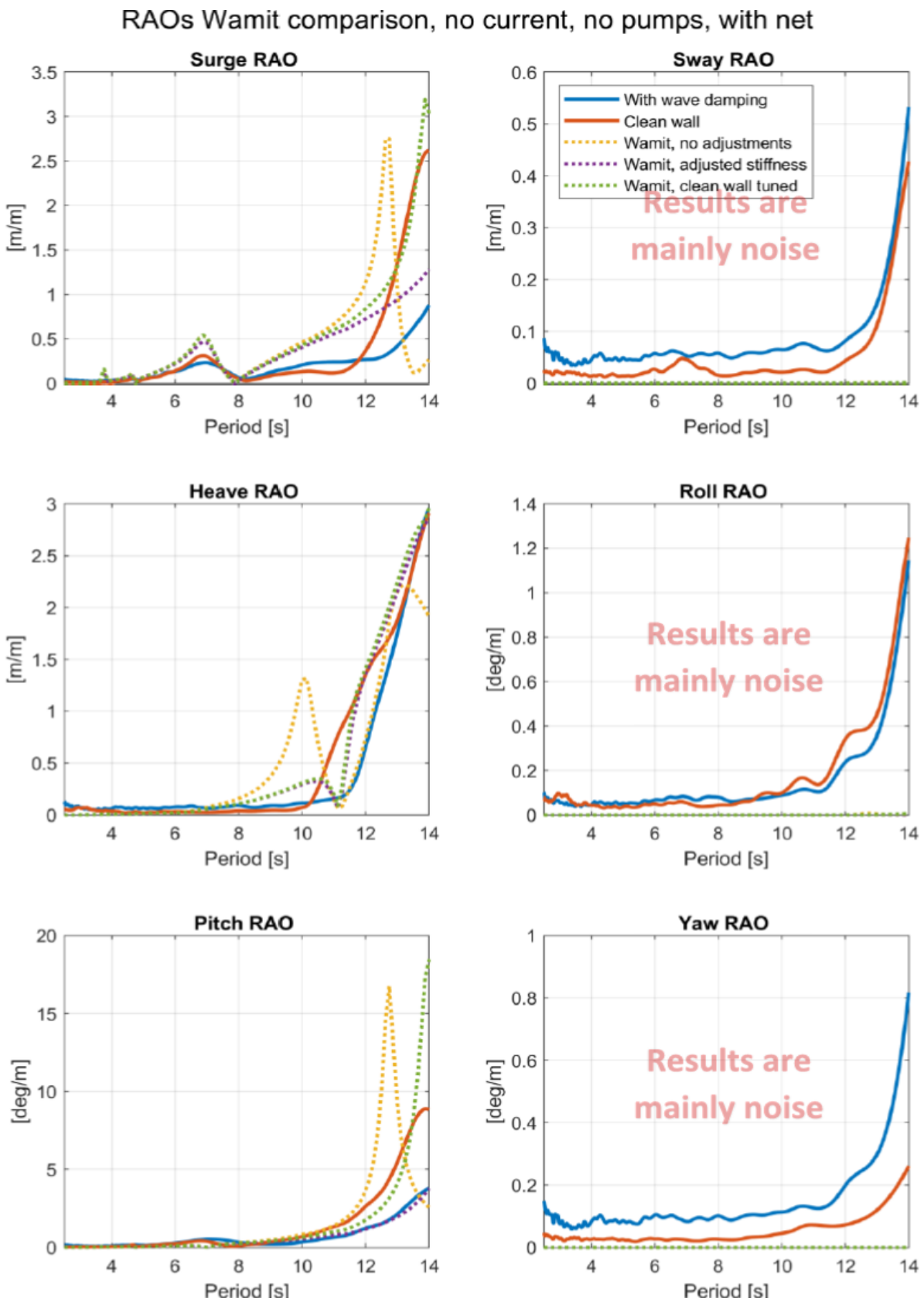
Den numeriske modellen som ble brukt for å etablere tilleggsmasse, demping, bølgelastkoeffisienter og responsamplitude-grafer (RAO'er) tar ikke med effekt av bølgedemper. Derfor må ulike justeringer gjøres for å få verdier som samsvarer med modellforsøk som inkluderer bølgedemping. Både med og uten de justeringene ser en god overenstemmelse mellom numeriske analyser og modellforsøk, og en kan observere en forskyving av for eksempel resonansperioder basert på om en tar hensyn til bølgedempingsvolumet eller ikke.

Basert på resultat fra modellforsøk var det nødvendig å justere massetreghetsmomentet til strukturen i de numeriske modellene.

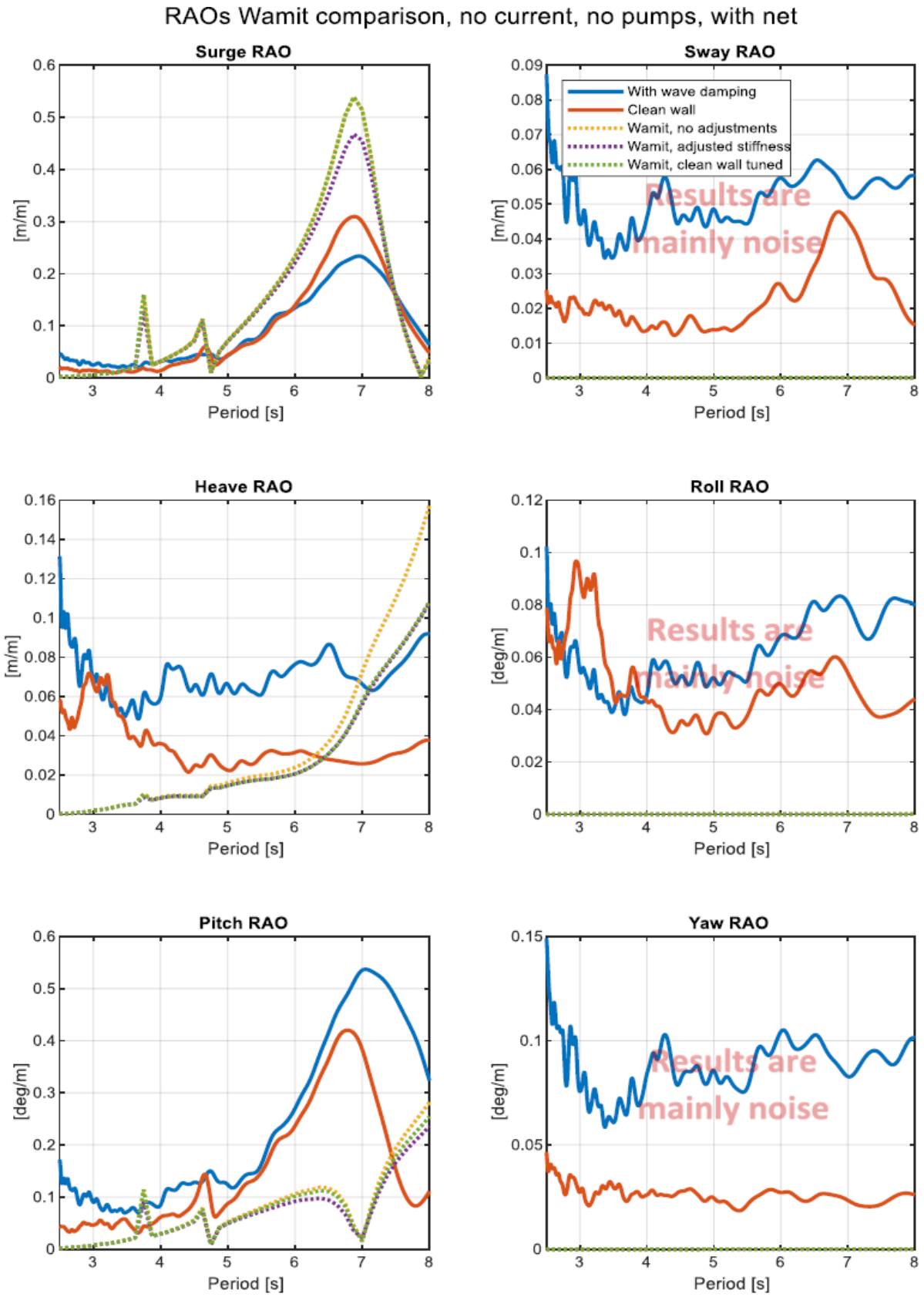
I plot for respons er det viktig å merke seg at bredspekter bølgeforsøk har signifikant energi bare opp til 12 s. Respons over 12 s er altså basert på utilstrekkelig datamengde og bør tillegges lite vekt. Siden modell bare er testet for 0 og 45 grader innkommende bølger er det ikke data for å etablere RAO'er for svai, rull og gir. Siden modellen er tilnærmet symmetrisk sirkulær vil en forvente tilsvarende resultat for rull som for stamp, og tilsvarende resultat for svai som for jag.

Global respons påvirkes ikke i merkbar grad av om not er installert eller ikke. Responsen påvirkes heller ikke av vanninjeksjon.

For global respons observeres det noen fenomen som for noen perioder gir ulike resultat mellom numerisk modeller (Wamit) og observasjoner fra fysisk modelltest. Dette ville vært nødvendig å undersøke nærmere dersom det medførte responsamplituder som kunne vært dimensjonerende, eller de oppstår i responsperioder som er relevante for dimensjonering. Men siden Hydra dimensjoneres for relativt beskyttende områder og skal operere i et område med lavere laster, og i periode-områder der vi stort sett har godt samsvar mellom numeriske modeller og fysisk modellforsøk, er dette ikke relevant. Responsen er også generelt liten og helt innenfor de verdier en klarer å gjenskape med numeriske verktøy for de relevante perioder. Selv om avvikene i noen tilfeller (for noen perioder) kan være relativt store (stor prosentvise avvik), så vil den globale responsen være svært liten, og dermed mindre relevant. Avvikene kan altså være av akademisk interesse, men har liten eller ingen praktisk betydning.



Figur 15 Sammenligning av global respons i form av RAO'er. Graf viser resultat fra modell test med bølgedemping, resultat fra modelltest uten bølgedemping ("clean wall"), og resultat fra numeriske analyser (Wamit) med ulike justeringer for å gjenskape resultat fra modellforsøk.



Figur 16 Sammenligning av global respons i form av RAO'er. Samme data som i Figur 15, men med mer relevant periode (x-akse) og respons (y-akse) for dimensjonerende miljølaster.

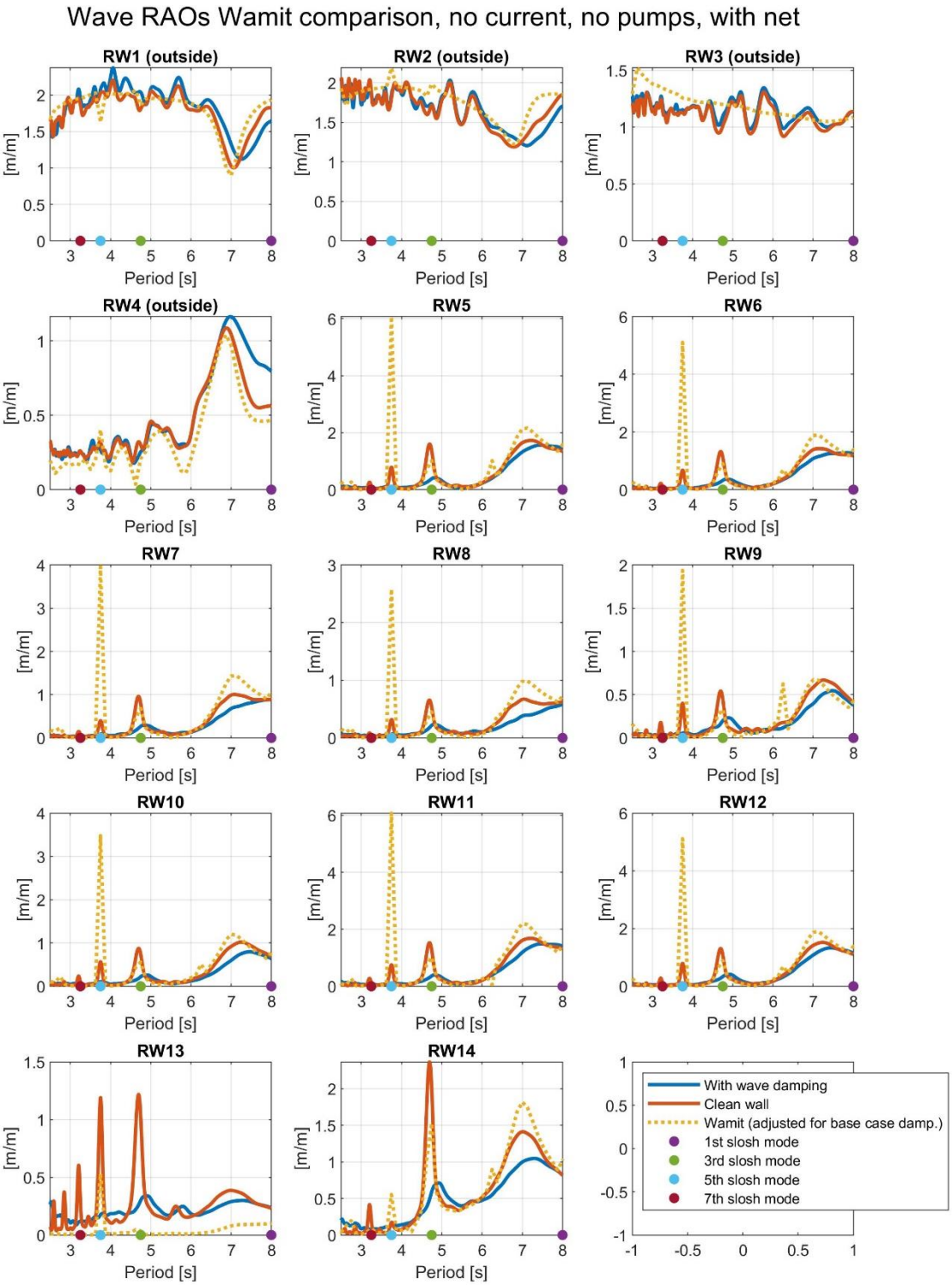
4.2 Interne bølger

Som et ledd i design-prosessen ble flere ulike konfigurasjoner av bølgedempersonen undersøkt med 2D og 3D CFD analyser for å vurdere effektiviteten opp mot hverandre. Basert på funn fra analyser av ulik dempestruktur, samt fra kompromiss i designprosessen ble to ulike design testet i modelltesten (ulik soliditet – samme utforming), samt en variasjon med glatt vegg for å estimere effekten av ikke å ha bølgedemper.

Frekvensdomeneanalysene (Wamit) stemmer godt med både teoretiske beregninger av sloshing-perioder og med resultat fra modellforsøkene. Amplitudene estimert fra frekvensdomenet blir normalt overpredikert, men her ser en også eksempler på at de underestimeres sammenlignet med resultatene fra modelltest. Overestimering av amplituder er ventet, mens underestimering er uventet, og peker på at frekvensdomene-analyser er svært nyttige for å estimere når resonans-fenomen kan oppstå, men har begrenset gyldighet for å estimere amplituder.

Resultatene fra modellforsøk viser en tydelig effekt av bølgedemperstrukturen. Strukturen er effektiv på å dempe både total bølgeenergi og på «run-up» effekter langs kanten av strukturen. Det er markant reduksjon i respons på resonansperiodene rundt tredje og femte sloshing mode. Det er også en generell reduksjon i energinivået sammenlignet med testene med glatt vegg (ingen bølgedemping). Det er imidlertid liten forskjell på de to ulike designene av bølgedempingsstruktur (ulik soliditet).

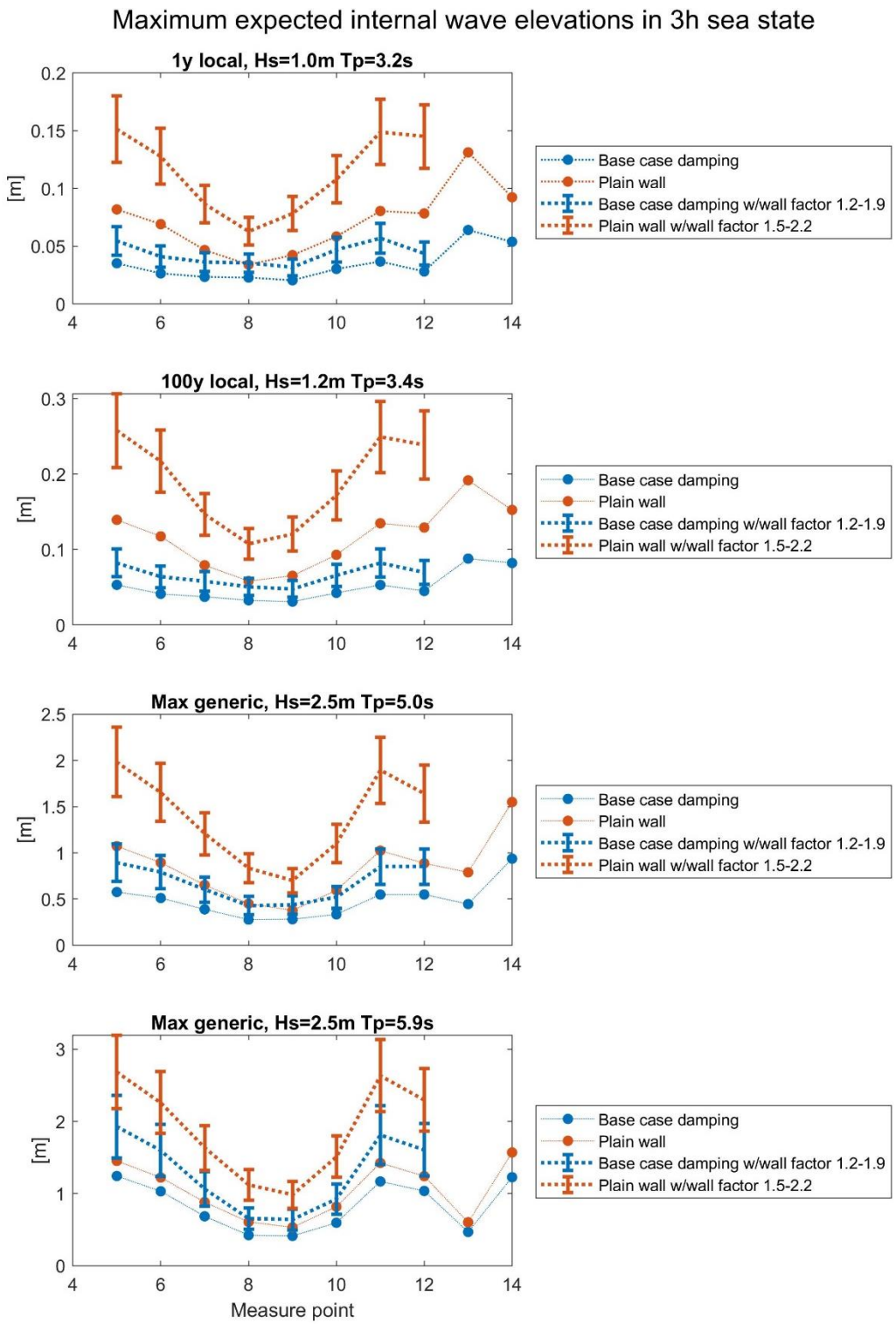
Effekten på intern bølgeheving med vanninjeksjon og med og uten not ble undersøkt, men det hadde ingen merkbar effekt.



Figur 17 RAO for ulike bølgemålere plassert i Hydra. Viser Wamit-resultat og resultat fra tester med og uten bølgedempingsstruktur.

Basert på resultat fra modellforsøk ble det utført en vurdering av opplevd intern bølgeheving med og uten bølgedemperstruktur. Intern bølgeheving vil være et problem for operasjon, utstyr på dekk (nothåndteringsdekk) og personsikkerhet dersom en opplever stadige og eller store interne bølger

langt over nothåndteringsdekket. Nothåndteringsdekket ligger 1,5m under hoveddekket, og 1,5m over vannlinjen ved produksjonsdypgang. Analysemodellen som er brukt klarer ikke å ta hensyn til ikke-lineære effekter (som for eksempel «run up» langs veggen mot not-dekket). For å få en indikasjon på denne amplituden ble det lagt til «veggamplifikasjonsfaktor» på 1.5-2.2. Størrelsen på denne faktoren er en kompleks problemstilling, og det finnes ulike modeller for å estimere den. Flere modeller peker på en avhengighet mellom faktoren og partikkelhastighet. Siden vi internt i produksjonsvolumet har liten eksitasjon av bølger vil også amplifikasjonsfaktoren ifølge flere teorier bli relativt lav. En «veggamplifikasjonsfaktor» på opptil 2.2 er derfor vurdert som konservativt. Selv om effekten av dempestrukturen er tydelig vil sannsynlig eksitasjon på lokalitet være liten nok til at intern bølgeheving ikke vil bli et problem selv uten bølgedemper (og med «veggamplifikasjonsfaktor»). Siden det for andre hensyn er utelukkende positivt å fjerne bølgedempestrukturen ble det som et resultat av modelltesten besluttet at denne kunne fjernes. Dersom Hydra skal re-lokaliseres til en annen lokalitet (med høyere Hs/Tp) må tilsvarende eller andre tiltak vurderes for å hindre at intern bølgeheving (pga. sloshing) blir et problem.



Figur 18 Sannsynlig maksimal lokal bølgeheving med og uten bølgedemping for lokalitetsspesifikke miljølaster og generiske dimensjonerende miljølaster.

4.3 Strømlaster

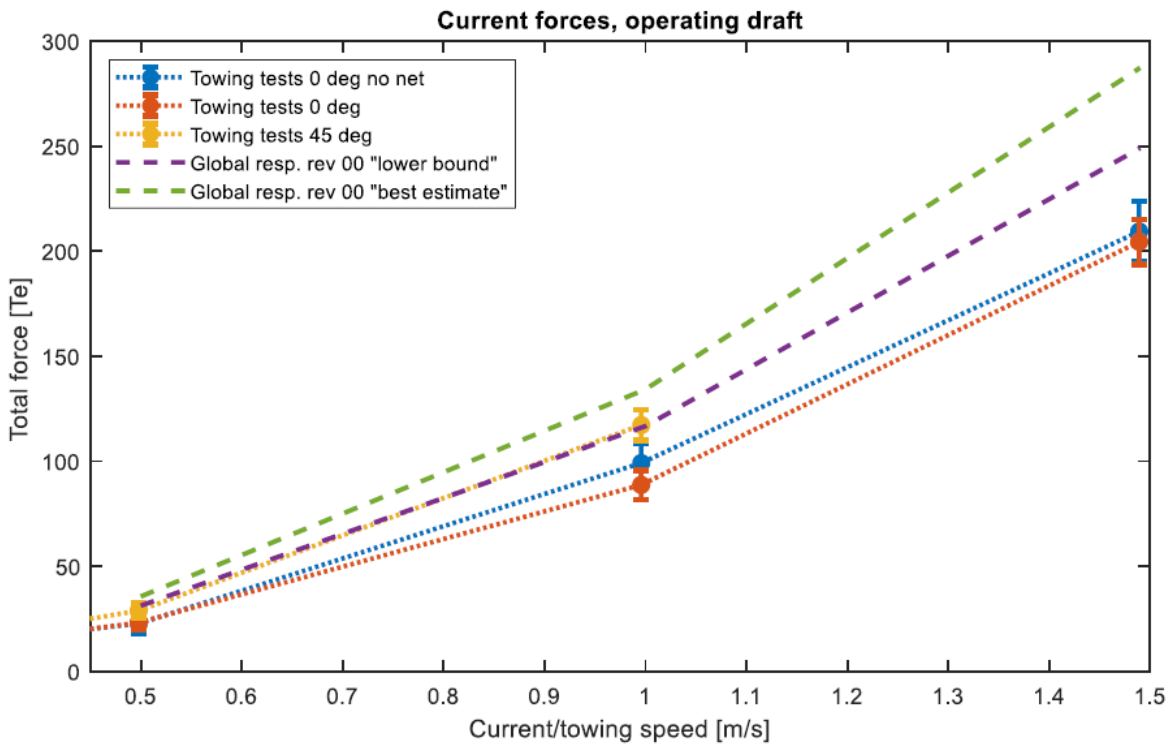
Det ble logget last på struktur (med og uten not) fra tester i både Havbassenget og Slepetanken. Pga. stor variasjon (tid og rom) i strømmen i Havbassenget er resultatene under primært fra forsøk i Slepetanken.

Lastkoeffisienter fra hhv. CFD og modelltest (tall fra slepeforsøk) er ikke direkte sammenlignbare pga. justering i geometri, noe som medfører stor endring i direkte last og forventet moderat endring i dragkoeffisient. Ved å se på last fra modellforsøk uten not fra 0 grader får en drag-koeffisient på 0.87 ved 0.5 m/s (0.18 standardavvik). Dette er svært nær den mest sammenlignbare drag-koeffisienten fra CFD forsøk på 0.79 – 0.86 (avhengig av geometri variasjon på foilseksjon) ved 0.5 m/s. En ser en tendens til økt drag-koeffisient fra modellforsøk relativt til CFD forsøk. Dette er forventet pga. at CFD bruker en enklere geometri som også er glattere enn den mere realistiske modellen brukt i modellforsøk.

En forskjell mellom CFD og modellforsøk er at modellforsøk gir større variasjon i dragkoeffisienter på ulike hastigheter. Som forventet går usikkerheten i målingene ned med økende hastighet.

Før resultat fra modellforsøk forelå ble det gjort estimat på last fra strøm. Resultat fra modellforsøk ligger tett opptil (nesten identisk) med det minst konservative estimatet gjort på et tidlig stadium.

En interessant observasjon er at total last på struktur faktisk går noe ned med (dobbel) not sammenlignet med målinger uten not. Samme tendens observeres både i slepeforsøk og i resultat fra strømlaster i Havbassenget (ref. Figur 19). Dette kan indikere at en økt gjennomstrømning igjennom foilseksjon er med på å øke den totale motstanden (strømlastene) på Hydra.



Figur 19 Last på Hydra fra strømlast estimat og resultat fra slepetester.

4.4 Bølgelaster og bølge/strømlaster

For å få estimat på laster fra bølger og strøm og bølger i kombinasjon utføres det simuleringer i tidsdomenet. Dette gjøres både med saktevarierende driftkrefter simulert, og med bare gjennomsnittlige driftkrefter inkludert. Sammenlignet med resultat fra modellforsøk ser en at tidsdomenesimuleringer som inkluderer effekt av saktevarierende driftkrefter får betydelig høyere

og mer realistiske makslaster enn de simuleringene som bare tar med gjennomsnittlige verdier for driftkrefter. Det er altså veldig viktig å implementere effekt av driftkrefter på en relevant måte ifm. for eksempel dimensjonering av forankringslaster. Gjennomsnittlastene på forankring er ca. like uavhengig av metode, men makslastene fra større utslag (amplitude) i variasjonene er utslagsgivende i estimering av makslaster. Om en bare ser på bølgelaster uten kombinasjon av strøm er amplituden større i analysene enn på modelltestene. I kombinasjon med strøm (som vil være dimensjonerende) er amplituden fra simulering og modellforsøk svært nært. Dette underbygger validiteten av simuleringer, og viser viktigheten av å gjøre gode, gjennomtenkte numeriske simuleringer ifm. dimensjonering av forankring.

Tabell 3. Fra korrelasjonsrapport: Sammenligning av maksimale og gjennomsnittskrefter på forankring fra modelltest, og to ulike dynamiske simuleringer.

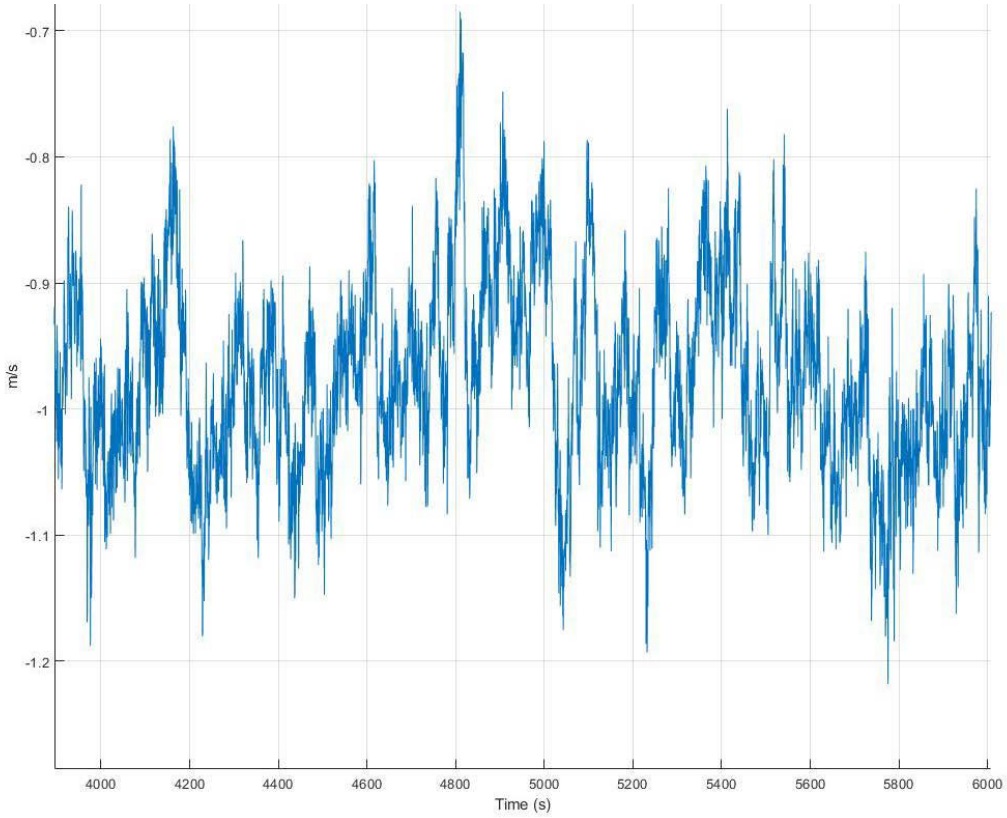
Case		Mean force [Te]	Max force [Te]	Std.dev. force [Te]
Hs=2.5m Tp=5.9s no current	Model test	16.3	73.4	13.5
	Remast mean drift	18.7	36.9	4.6
	Remast slow drift	18.7	86.7	20.6
Hs=2.5m Tp=5.9s 0.89m/s current	Model test	134.4	169.1	10.9
	Remast mean drift	133.3	143.9	2.3
	Remast slow drift	133.5	170.3	8.3

4.5 Interne strømninger

Resultatene fra CFD analysene viser gode indikasjoner på sammenheng mellom strømhastighet og tid for vannutskifting. Denne ser ut til å være direkte proporsjonal med strømhastighet. CFD analysen bruker en konstant og homogen strømhastighet. Strømforsøk i Havbassenget bruker en konstant gjennomsnittstrøm, men denne har relativt store variasjoner i tid og rom, inkludert en tydelig avtagende hastighetsprofil ned mot bunn (ref. Tabell 4 og Figur 20). Slepeforsøk i slepetanken gir tilsvarende forutsetninger som CFD forsøk med konstant homogen strømprofil.

Tabell 4 Dokumentert strøm med gjennomsnitt (mean) og standardavvik (STD) på 3 dybder.

Depth	Curr_low mean	Curr_low STD	Curr_high mean	Curr_high STD
2 m	0.134 m/s	2.75%	0.977 m/s	7.7%
15 m	0.118 m/s	2.62%	0.901 m/s	9.2%
27 m	0.111 m/s	2.61%	0.781 m/s	9.4%



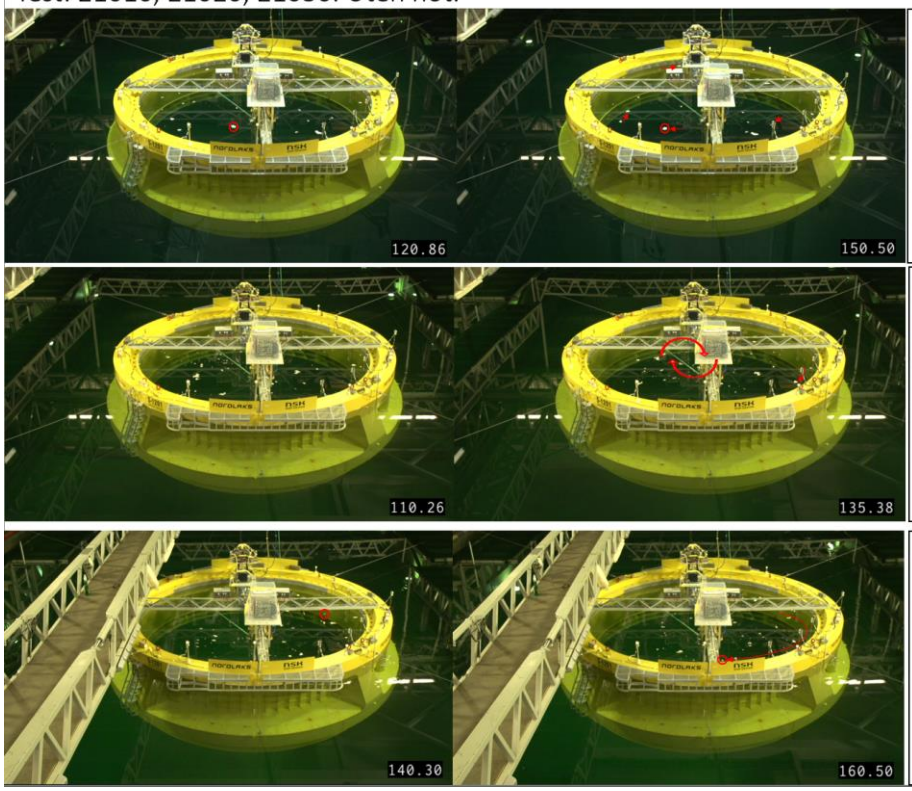
Figur 20 Plot over logget strøm på 2m uten modell til stede (kalibrering). Plot viser kalibrering av "Høy Strøm" med mål om 1.0m/s. Resultat gir gjennomsnittstrøm på 0.977m/s med standardavvik på 7.7%.

Resultatene fra de tre elektromagnetiske strømmålerene inne i tanken gir begrenset indikasjon på strømforholdene og strømstyrken inne i tanken. Målerne gir kun resultat i x- og y-retning for hvert prøvepunkt. Det er observert store variasjoner i strømstyrke; noen er relativt periodiske, mens de fleste fremstår som mer kaotisk. Målerne kan fange opp støy både fra struktur og andre målere i nærheten, men denne har som oftest så høy frekvens at den kan filtreres bort. På noen av slepetestene fanget imidlertid målerne opp mye støy med lik frekvens som strømmen som skulle måles og støyen lot seg derfor ikke filtrere bort. Dette ble imidlertid korrigert ved å isolere målere og motor på slepevogna.

Trådkorset (ref. Figur 11) var mulig å se fra begge videokamera som var satt opp inne i Hydra. Dessverre har resultater herfra begrenset verdi fordi trådbitene ikke var følsomme nok til å indikere strømretning på relativt lave strømhastigheter. Kun på forsøkene med de høyeste slepehasighetene ble det gjort observasjoner av tydelige retningsendringer på trådbitene. Dette gjelder alle tester, med og uten not, med og uten intern strømsetting (vanninjeksjon). Fra andre observasjoner er det tydelig at det er variasjon i strømningen rundt trådkorset, men dessverre var ikke følsomheten tilstrekkelig til å indikere strømbildet.

På slepeforsøket ble det tilsatt flytende, lette partikler inne i tanken. Dette var ikke mulig å gjøre i Havbassenget pga. fare for kontaminering av bassenget. Partiklene gjør det mulig å følge strømbildet på overflaten. Det er ikke nødvendigvis fullstendig korrelasjon mellom strømningen i overflaten og hastigheten og retningen på partiklene, men det gir en god indikasjon.

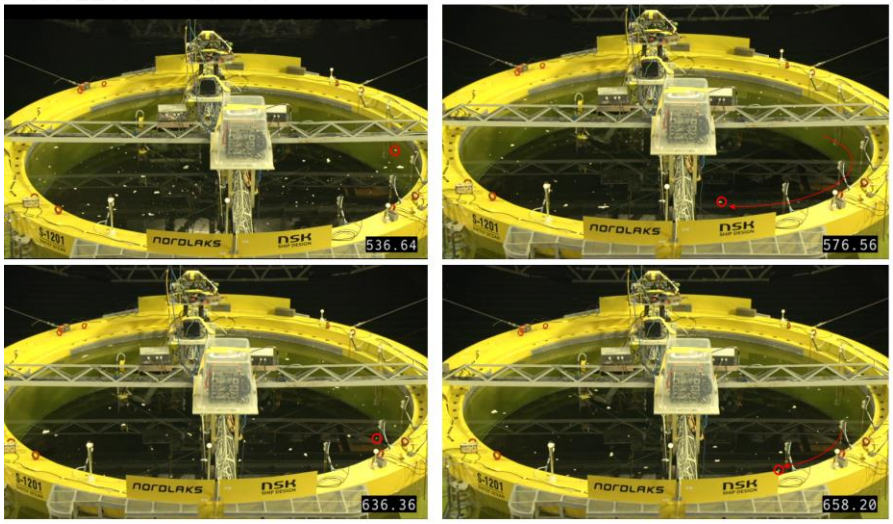
Test: 21010, 21020, 21030. Uten not.



0.15 m/s	Tydelig bevegelse av vannmasser, men med lav hastighet i overflate. Lite forstyrrelser skal til for å stoppe partikler i overflaten.
0.50 m/s	Stor, midlertidig lokal virvel. Lokale bakevjer. Stor bevegelse i vannmassene
1.0 m/s	Jevn hastighet. Mye bevegelse

Figur 21 Øyeblikksbilde av partikkelbevegelser ved slep på 0.15 m/s, 0.5 m/s og 1.0 m/s.

Test: 22050. Med not



1.50 m/s	Slep stoppet etter 536s. 40s senere viser uthevet partikkel at det fortsatt er bevegelse på overflaten.
1.50 m/s	100s (tilsvarende 7,5min i fullskala) etter slepet har stoppet er det fortsatt tydelig bevegelse på overflaten.

Figur 22 Øyeblikksbilde av partikkelbevegelser etter slep på 1.5 m/s er avsluttet. Første bilde viser situasjonen 536 s ut i forsøket der Hydra er slepet med en hastighet tilsvarende 1.5m/s i fullskala. Etter 536 s stopper slepet og bevegelse i vannmassene etter dette er ikke pga. ekstern strøm, men pga den allerede etablerte virvelen inne i Hydra.

Ved å observere hvordan vannmassene settes i bevegelse ved oppstart av slep og hvordan de holder på virvelen lenge etter slep er avsluttet kan en få indikasjoner på hvordan foilseksjonen fungerer i homogen strøm og hvordan den mest sannsynlig vil fungere i inhomogen / turbulent strøm. Ved oppstart av slep på de største hastighetene (her observert med not installert test nr 22040; 1.0 m/s og 22050; 1.5 m/s) ser en at det relativt hurtig settes opp en strøm som først vises i form av «upwelling» på styrbord side av Hydra (høyre side om en ser fremover i fartsretning under slep).

Deretter ser en at overflatestrømmen etableres. På de høyeste strømhastighetene (1.5 m/s) ser en også endring av strømretning indikert av trådkorset. Selv om dette best observeres ved høyere strømhastigheter anses det som relevant da CFD analysene viser at vannutskifting er proporsjonalt med strømhastighet. Samme effekt antas da å være tilstede ved lavere hastigheter, men da vanskeligere å observere. Den «upwelling»-effekten som vises ved oppstart, men som ellers er vanskelig å observere pga. oppdrift i partikler, stemmer overens med visualisering fra CFD analyser.

Ved lave slepehastigheter brukes det en del tid før en kan observere en tydelig overflatestrøm. Ved høyere slepehastigheter etableres den hurtig, men er mer kaotisk i starten, og går inn i en mer stabil rotasjon en stund ute i slepet. Ved både høye og lave hastigheter ser en flere lokale små og større virvler inne i tanken.

Fra opptak av slepeforsøk med høy hastighet (test 22050; 1.5 m/s) kan en fremdeles, mer enn 3 min etter at slepet stoppet, se en rotasjon av vannmassene inne i Hydra (tydelig, men selvsagt avtagende). 3 min i modellskala tilsvarer 13.4 min i fullskala. Det samme ses på lavere hastigheter (der en har tilgang til opptak etter slepet er stoppet), men det er naturligvis mest tydelig på høyere hastigheter.

Det ser ut som høye strømhastigheter relativt raskt setter opp virvel i tanken, og at denne bevares godt en periode selv uten innkommende strøm. Det er derfor sannsynlig at den varierende strømhastigheten som er å forvente på en reell lokalitet vil ha en effekt der periodevise høye strømhastigheter er med på å sikre gjennomstrømning (virvling) i påfølgende perioder med lavere eller manglende strøm inn mot foilseksjonen. Hvordan dette påvirkes av endring i strømretning er vanskelig å forutse og det er ikke utført forsøk som simulerer denne effekten, men i teorien skal foilseksjonen fungere tilsvarende uavhengig av retning på innkommende strøm.

Det ble også gjort observasjoner som ikke er lette å dokumentere ved å se på strømning i Hydra under forsøk i havbassenget. Ved å sitte på observasjonsplattform rett over eller på siden av Hydra kunne en observere små partikler og rester etter rigging som fløt rundt påvirket av strømningen inne i Hydra. Selv om det ble logget video var dette så små partikler, og egentlig litt tilfeldig utfra hvilke små partikler som ble værende inne i tanken at det er umulig å logge eller dokumentere. Tross dette er det kanskje dette som ga mest innsikt i selve strømbildet for de som observerte. Dette er med på å underbygge behovet for visuelle observasjoner og erfaring i både modell- og fullskala tester. Numeriske analyser og kvantifiserbare tall fra faktiske målinger gir verdifull, men begrenset innsikt i strømningsbildet.

4.6 Vindlaster

I tidlig fase ble det utført estimat av vindlast på Hydra. Det ble der ikke skilt mellom åpent og lukket tak – dvs. det ble bare regnet med lukket tak, men pga. stor usikkerhet i metoden ble det her oppgitt tre ulike estimat; Lavt, Beste og Øvre estimat. Fra modelltesten ser vi at vindlast på Hydra er en del høyere med tak-dekket av enn om taket er på. Pga. litt ulikt projisert areal mellom tidlige estimat og vindtunnel-modell oppgis sammenligning ikke direkte på last-koeffisient (C_D), men som last-koeffisient ganger projisert areal (A).

Total last (F_D) fås fra dragformelen: $F_D = \frac{1}{2} C_D {U_W}^2 A$, der U_W er relevant vindhastighet.

Tabell 5 Resultat vindtunnel test sammenlignet med tidlige estimat.

		Modelltest	**Tidlige estimat**		
		C_D*A [m^2]	**C_D*A [m^2]**		
			Lavt	**Best**	**Øvre**
Produksjonsdypgang	**Dekket**	385.4	430.5	780	970.9
	Åpent tak	716.9			
Float out dypgang	**Dekket**	1427.8	1917.2	2922.3	3682.6
	Åpent tak	1540.1			

Resultat fra vindtunneltest viser viktigheten av gode estimat på vindlaster (eller modellforsøk) for denne type konstruksjoner.