



Memo

Samsvarsvurdering hydrodynamisk analyse Marine Donut

Rev 01 – 30. November 2025



Ranold.

Ranold AS

Visiting address: Hydrovegen 67, NO-3936 Porsgrunn, Norway
Postal address: P.O.Box 1045, NO-3905 Porsgrunn, Norway
T: +47 99 15 23 89 | www.ranold.com | Org.no 985 987 483 VAT



Ansvarsfraskrivelse

Dataene som ligger til grunn for denne rapporten er samlet inn av Ranold AS, heretter kalt Ranold. Ranold har samlet dataene etter beste kunnskap, evne og i god tro fra kilder som vurderes å være pålitelige og nøyaktige. Ranold har forsøkt å sikre nøyaktigheten av dataene, men Ranold gir ingen garantier med hensyn til nøyaktigheten eller fullstendigheten til den rapporterte informasjonen. Ranold påtar seg intet ansvar eller ansvar for eventuelle feil eller utelatelser i informasjonen eller tap eller skade som følge av bruken av informasjonen i denne rapporten. Dette dokumentet kan stille krav i tillegg til gjeldende lover. Ingenting her har imidlertid til hensikt å erstatte, endre, overgå eller på annen måte avvike fra gjeldende lover knyttet til emnet for dette dokumentet. I tilfelle konflikt eller motsetning mellom bestemmelsen i dette dokumentet og gjeldende lov med hensyn til implementering og styring av dette dokumentet, skal bestemmelsen i gjeldende lov ha forrang.

Revisjons- og godkjenningsskjema

MEMO				
Tittel				
Samsvarsvurdering hydrodynamisk analyse – Marine Donut				
Memo nr.		Revisjonsdato	Revisjonsnr.	
Ranold-2023-1578		30.11.2025	01	
Kunde		Kundekontakt	Kundens referanse	
SalMar AS		Steingrim Holm	-	
Rev. Nr.	Revisjonshistorie	Dato	Forberedt	Godkjent
00	Utstedt for kommentarer	03.10.2025	EB/BSH	MK
01	Lagt til innvendig trykk	30.11.2025	EB	MK
Navn		Dato	Signatur	
Forberedt av		30.11.2025		
Emil Berger Bente Helgeland				
Godkjent av		30.11.2025		
Marit Kleven				



Innholdsfortegnelse

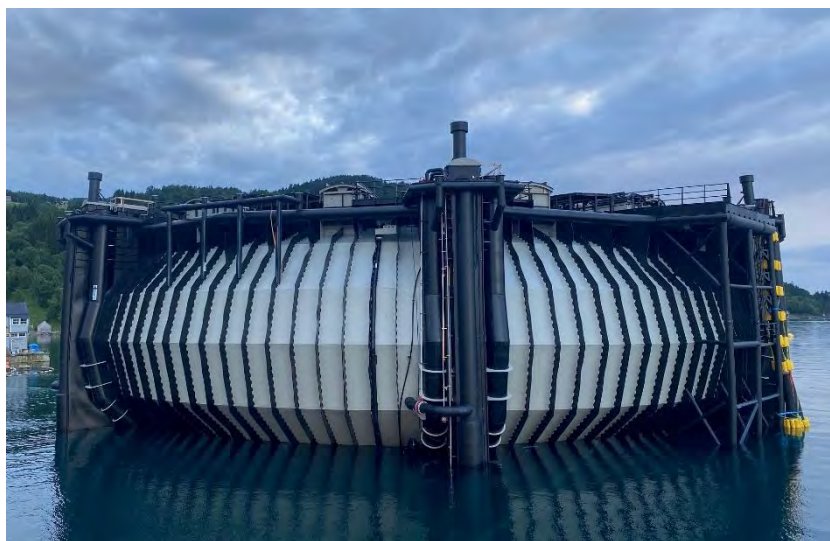
1	BAKGRUNN	5
2	FELTMÅLINGER	6
2.1	INTRODUKSJON	6
2.2	TRYKKMÅLINGER	6
2.3	MÅLING AV BØLGER OG STRØM	8
2.4	MÅLEDATA BØLGER	9
2.5	MÅLEDATA STRØM	11
3	VALG AV PERIODE FOR SAMMENLIKNING MED BEREKNINGER	12
4	MÅLERESULTATER	16
4.1	MÅLEDATA FOR TRYKK	16
4.2	BEVEGELSER	17
4.3	BEVEGELSESMÅLINGER	18
4.3.1	<i>Akselerometer og krengningsmåler</i>	18
4.3.2	<i>Stamp og rull</i>	19
4.3.3	<i>Normalisert akselerasjon i instrumentets horisontal- og vertikalplan</i>	20
4.4	USIKKERHETSMOMENTER RUNDT MÅLINGER	22
5	KOORDINATTRANSFORMASJONER AV MÅLEDATA	24
5.1	INTRODUKSJON	24
5.2	POSISJONERING AV ANLEGGET	24
5.3	PLOSSERING AV LASTKONTEINER MED MÅLEUTSTYR	26
5.4	BØLGEMÅLINGER	27
5.4.1	<i>Bølgeretning</i>	27
5.4.2	<i>Bølgehøyde og -periode</i>	30
5.5	STRØMMÅLINGER	31
5.6	ORIENTERING AV AKSELEROMETER/IMU	33
5.6.1	<i>Omregningsprosedyre</i>	34
6	HYDRODYNAMISK MODELL (AQWA)	36
6.1	INTRODUKSJON	36
6.2	BEREGNINGSOPPSETT	36
6.2.1	<i>Bølgeretninger</i>	37
6.3	TRYKKBEREGNINGER	38
6.3.1	<i>Innvendig trykk</i>	40
6.4	AKSELERASJONS- OG ROTASJONSBEREGNINGER	41



7	SAMSVARSVURDERING NUMERISK MODELL OG MÅLEDATA	43
7.1	INTRODUKSJON	43
7.2	SAMMENLIKNING AV TRYKK	43
7.2.1	<i>Innvendig trykk</i>	<i>45</i>
7.2.2	<i>Trykk differansen</i>	<i>46</i>
7.3	SAMMENLIKNING BEVEGELSER 6-DOF (FRIHETSGRADER)	47
7.3.1	<i>Introduksjon</i>	<i>47</i>
7.3.2	<i>Sammenlikning akselerasjon</i>	<i>47</i>
7.3.3	<i>Bevegelse i horisontalplanet</i>	<i>49</i>
7.3.4	<i>Sammenlikning rotasjonsbevegelse</i>	<i>50</i>
8	OPPSUMMERING OG KONKLUSJON	52
9	REFERANSER	53
10	VEDLEGGSLISTE	53

1 BAKGRUNN

Bluegreen Fusion (BGF) har levert en ny type flytende og lukket oppdrettsmerd til SalMar. Anlegget er formet som en smultring og går under betegnelsen Marine Donut (MD), se Figur 1, hvor MD ligger i vedlikeholdsposisjon (ikke nedsenket). Oppdrettsanlegget har vært gjennom produktsertifisering iht. NS 9415:2021 og ligger nå på lokasjon på Sekken, en øy i Molde kommune, nærmere bestemt Seterneset.



Figur 1: Marine Donut (MD), i vedlikeholdsposisjon (ikke nedsenket) [6]

Ranold AS har tidligere assistert BGF i designfasen av MD, både med detaljerte CFD beregninger for å verifisere og optimalisere den interne strømmingen inni mantelen for økt fiskevelvære, og med hydrodynamiske responsanalyser i forbindelse med produktsertifisering [1].

Ranold har siden oppstart i 2006 etablert seg som et av de tyngste miljøene i Norge innenfor strømningskompetanse. I 2025 har selskapet 10 ansatte og har levert over 1700 prosjekter siden oppstart. Ranold benytter programvare fra den anerkjente leverandøren ANSYS, versjon 2022R2 (eller nyere); ANSYS AQWA og ANSYS FLUENT.

Plassert på Seterneset har Sintef utført trykkmålinger på strukturen, både utvendig og innvendig [2]. Disse målingene viser bl.a. påvirkningen fra bølger på strukturen. Sintef har også levert måledata for kjedestrekkmålinger med lastsjakler, akselerasjon i 3 koordinatretninger, og krengning (rull og stamp) av strukturen [2]. Åkerblå har målt bølger og strømmer ved lokasjonen [3]. Disse målingene har blitt brukt til å definere bølger og strøm i beregningsmodellen. Resultatene fra beregningene har så blitt sammenlignet med målingene på strukturen.

SalMar har forespurt Ranold AS om å assistere med en samsvarsvurdering mellom målinger og beregnede verdier (AQWA). Dette dokumentet sammenligner målingene fra de fysiske målingene med resultater fra bevegelses-modelleringen utført av Ranold AS. Samsvarsvurderingen danner grunnlag for å vurdere om teori (beregningene) og praksis stemmer overens.

2 FELTMÅLINGER

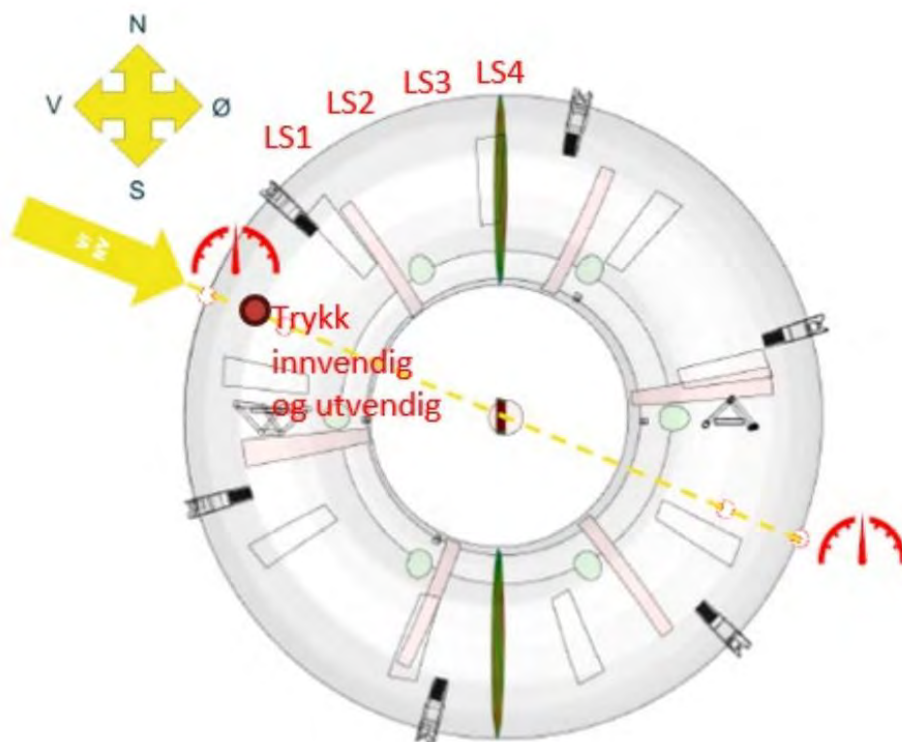
2.1 Introduksjon

Bølger og strøm gir eksterne laster (miljølast) på donuten. Sintef har målt trykk både utvendig og innvendig i donuten. De har også målt kjedestrekke på lastsjakler [2]. Sintef har også rapportert målinger på donutens bevegelser med akselerometer og krengningsmåler [2][4]. Disse måleapparatene rapporterte også lokasjon vha. GPS-målinger.

Strømmålinger og bølgemålinger ved lokasjonen har blitt gjort av Åkerblå [3].

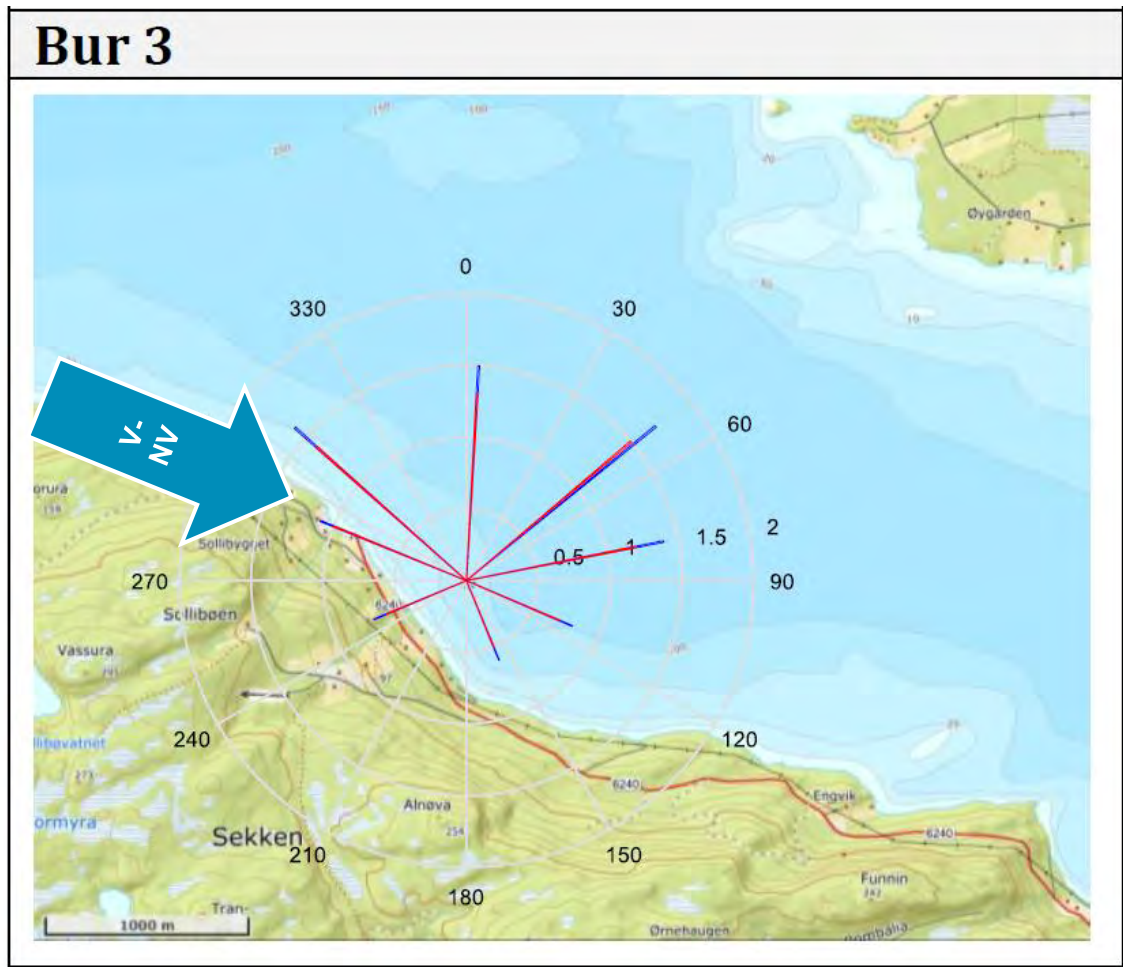
2.2 Trykkmålinger

Målingene ble utført ved å plassere trykksensorer fra Kulite [2] på nordvestsiden av donuten. Disse måler absolutt trykk, og fanger dermed opp endringer i atmosfæretrykk og endringer i dypgang. Det ble plassert en sensor på utsiden, og en på innsiden av veggen. Figur 2 viser omtrentlig plassering av trykksensorene. Plasseringen baserer seg på hovedretningen for innkommende bølger.



Figur 2: Plassering av trykksensor på donut

Figur 3 viser rosedigrammet for vindgenererte signifikante bølger [3]. Vestlig og nordvestlig vind er vanligst ved lokasjonen. Det ble derfor anbefalt å plassere trykksensorene i vest-nordvestlig posisjon. 10- og 50-års signifikant bølgehøyde er beregnet til hhv. 1,4 og 1,6 meter for vind fra 312-330°. For vind fra 292° er de signifikante bølgehøydene beregnet til hhv. 1,0 og 1,1 meter [3].

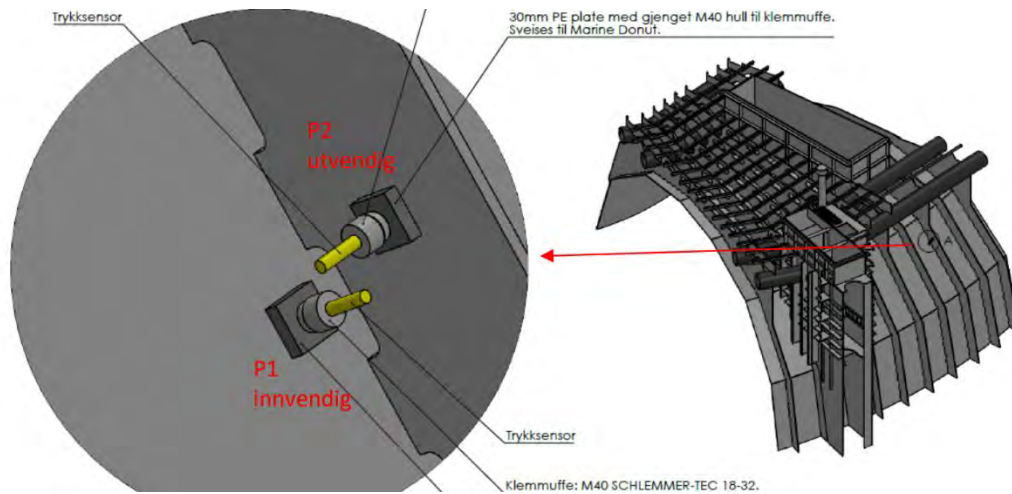


Figur 3: Rosediagram for vindgenerert 10- (rødt) og 50-års (blått) signifikant bølgehøyde for bur 3 der donuten er plassert.

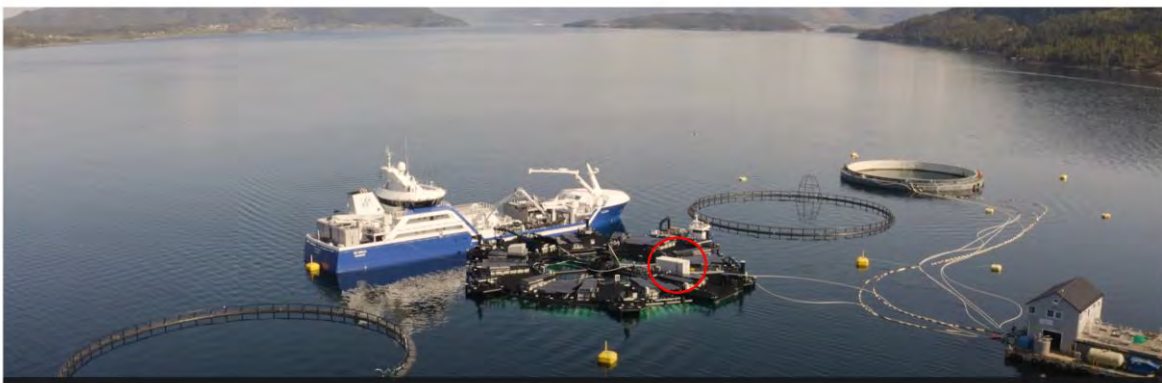
Figur 4 viser den utvendige og innvendige sensorplasseringen på donuten, like ved en av lukene. Trykkmålingene er registrert med QuantumX med frekvens 20Hz. Trykket er rapportert i mm H₂O, og omregnet til Pascal (Pa).

Det er installert på kjedestrekkmåler på hver av de 4 lastsjaklene på den nordlige siden av donut. Disse er kalt LS1, LS2, LS3 og LS4, og er indikert i Figur 2. Disse måler krefter på fortøyningen. ScaleAQ gjør samsvarsvurdering for kjedestrekkmålingene.

Akselerasjon og krenkning er målt med et IMU instrument (inertia measurement unit) med frekvens 20 Hz. Krenkningen er målt med en vinkelmåler. Denne kan anses som en gyro som måler vinkelutslag på 45°. Denne stilles inn med definerte x- og y-retninger. Posisjonen er registrert med en GPS-måling fra MTP-serveren. Instrumentene og serveren er plassert i lastkonteineren [4].



Figur 4: Plassering av trykksensor donut (Figur fra Sintef [2])



Figur 5: Lokasjon av konteineren der IMU- og GPS-instrumentene er plassert.

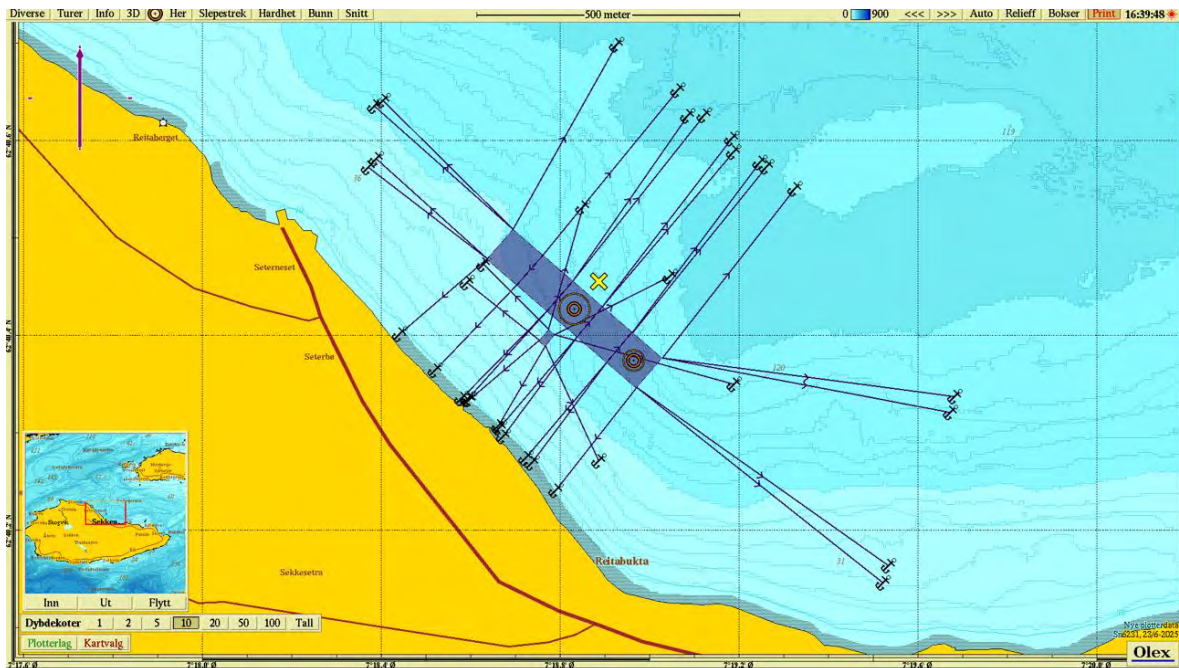
2.3 Måling av bølger og strøm

Åkerblå har gjennomført målinger av bølger og strøm like ved donuten [3].

Figur 6 viser plasseringen av målebøya markert med et gult kryss. På bøya er det måleinstrumenter for både bølgemålinger og strømmålinger ved 5 meter og 15 meter dyp. Målingene for bølgene oppgir retningen de kommer fra, mens strømmen er oppgis i retningen den strømmer. Hvis bølgene og strømmen har lik retning vil målingene derfor avvike 180° p.g.a. konvensjon.

Måleperioden for bølgene er fra 06.05.2024 til 08.04.2025. Bølgebevegelsene ble målt i 17 minutter fra hver hele time, og så ble bølgestatistikk beregnet fra denne perioden. De resterende 43 minuttene av hver time ble det ikke målt bølger. Måledataene oppgir viktige parametere som bl.a. signifikant bølgehøyde, maksimal bølgehøyde, peak-periode og den gjennomsnittlige bølgeretningen over alle frekvenser. Åkerblå rapporterte ferdig behandlede data.

Vannets strøm er målt i samme tidsperiode som bølgene. Strømmens fart og retning måles. Disse instrumentene kan rotere om en vertikal akse. Instrumentenes «heading», altså kompassretning, registreres også. Strømmens retning måtte justeres med instrumentets kompassretning.



Figur 6: Figuren viser lokaliseringen til donut i bur 3. Det gule krysset nordøst for donut er plasseringen av bøye for bølge- og strømmålinger [5].

2.4 Måledata bølger

Måledataene for bølger er levert som Excel-filer. De variablene som er rapportert i filene er [3][5]

- Dato og klokkeslett.
- Spectrum, som viser til beregningsmetoden som instrumentet bruker
- **Hm0**: Denne verdien beregnes fra spekteret, og brukes ofte for å bestemme signifikant bølgehøyde, også benevnt Hs. Dette er en standard definisjon, hvor m0 er det nulte momentet av spekteret.

$$H_{m0} = 4 \cdot \sqrt{m_0}$$

- **H3**: Gjennomsnittlig høyde av den tredjedelen høyeste bølgene (statistisk definert). H3 er beregnet fra tidsserien i stedet for spekteret. H3 brukes også noen ganger til å bestemme den signifikante bølgehøyden Hs. H3 og Hm0 er ofte ganske like, men altså beregnet fra hhv. tidsserien og spekteret.
- **H10**: Gjennomsnittlig høyde av de 10% høyeste bølgene (statistisk definert).
- **Hmax**: Maksimal bølgehøyde observert i måleperioden.
- **Hmean**: Gjennomsnittlig bølgehøyde.



- **Tm02:** Gjennomsnittlig bølgeperiode basert på momentene m_0 og m_2 fra spekteret
$$T_{m02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}}$$
- **Tp:** Peak period – perioden ved maksimal energi i bølgespekteret.
- **Tz:** Gjennomsnittlig nullkryssingsperiode, altså tiden mellom bølger målt fra nullkryssing (vanlig i tidsserier). Antall punkter som er over et visst nivå.
- **T3:** Gjennomsnittlig periode for den tredjedelen høyeste bølgene.
- **T10:** Gjennomsnittlig periode for de 10 % høyeste bølgene.
- **Tmax:** Perioden til den høyeste (maksimale) bølgen observert.
- **DirTp:** Bølgeretningen (i grader) ved peak period T_p . Angir hvilken retning bølgene kommer fra. 0° er fra nord. Bølgen kommer rett fra vest ved 270° .
- **SprTp:** Spredning, oppgitt som standardavvik i bølgeretning ved peak period. Verdien gir et uttrykk for hvor "lik retning" bølgene kommer fra. Denne oppgis i grader.
- **MeanDir:** Gjennomsnittlig bølgeretning over alle frekvenser.
- **Unidirecldx:** Et mål på hvor ensrettet bølgene er. Høy verdi $\rightarrow$ bølgene kommer fra én retning, lav verdi $\rightarrow$ mer kaotisk eller stor spredning. Variabelen har en verdi mellom 0 og 1, og beskriver hvor stor del av bølgeenergien som er fra en bestemt retning. Den bør ha verdi nær 1 for at målingen skal kunne sammenlignes med beregninger.
- **MeanPressure:** Gjennomsnittlig trykk (ofte målt med trykksensor – brukes til å estimere vannstand eller dybde). Verdien gir et bilde på overflatehevingen. Måles fra bunn i mm H₂O.
- **MeanASTDistance:** Gjennomsnittlig avstand til havoverflaten målt med AST (Acoustic Surface Tracking). Verdien avhenger av hvordan instrumentet er satt opp, men den bør være lik MeanPressure.
- **MeanASTDistance (Ice(m)):** Gjennomsnittlig målt avstand til isoverflaten – bare relevant for målinger under isdekke.
- **No Detects:** Antall måleintervaller der ingen bølgedeteksjon ble gjort.
- **Bad Detects:** Antall målinger som ble registrert, men klassifisert som dårlige eller upålitelige.
- **Number of Zero-Crossings:** Antall nullkryssinger i overflatetidsserien. Denne verdien brukes i beregning av perioder, og henger tett sammen med T_z .
- **Current speed (wave cell) (m/s):** Strømhastighet målt i den øverste målecellen (nær overflaten). Denne cellen måler strøm og bølger samtidig, og logger en strømhastighet. Åkerblå har anbefalt at denne ikke bør brukes [5].
- **Current Direction (wave cell) (degrees):** Strømmens retning i grader (hvor strømmen går mot), målt i den øverste målecellen (nær overflaten). Denne cellen måler strøm og bølger samtidig, og logger strømhastighet og retning. Åkerblå har anbefalt at denne ikke bør brukes [5].
- **ErrorCode:** En kode som indikerer tekniske feil eller avvik i målingen, f.eks. sensorfeil, tap av data, strømbrudd etc.



Tidspunktene var oppgitt i norsk normaltid. Det var derfor nødvendig å endre disse til UTC for å sammenholde med måledata for trykk.

2.5 Måledata strøm

Vannets strøm er også viktig for å beregne miljølastene på donut.

Måledataene er levert i Excel-filer. Måleverdiene er oppgitt hvert 10. minutt. Måledataene som er oppgitt er [3][5]

- Dato og klokkeslett
- **Speed:** Strøm målt i cm/s.
- **Direction:** Strømmens retning, oppgitt som den kompassretningen i grader (°) strømmen beveger seg i. Kan leses som retningsvektoren for strømmen.
- **North/East:** Dekomponering av totalvektor (Direction) i nordlig og østlig komponent.
- **Heading:** Hvordan instrumentet har rotert, oppgis som kompassretning av instrumentet. 0° er nord, og 90° er mot øst.
- **Pitch/Roll:** Mål på instrumentets rotasjon om x- og y-aksene (de horisontale).
- **Tilt:** Avviket fra vertikal posisjon for instrumentet. Verdien er beregnet fra pitch og roll.
- **Andre målinger:** Instrumenttekniske verdier, temperatur, trykk og vertikal hastighet.

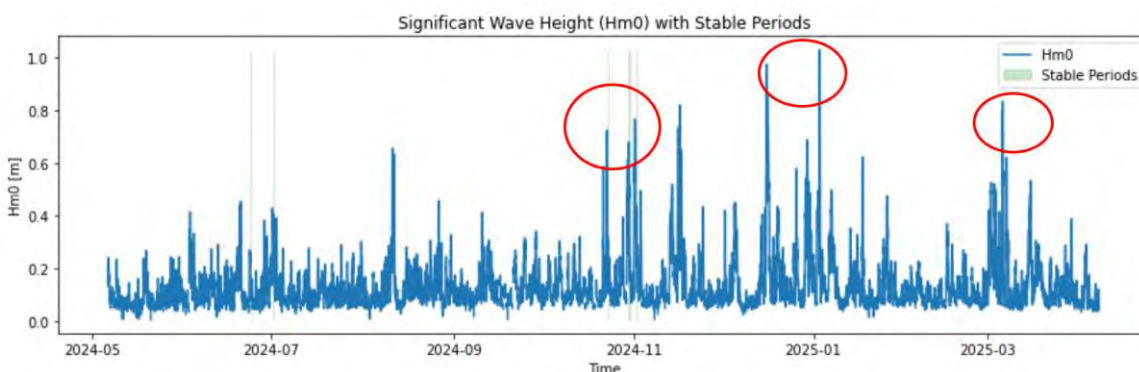
Retningsmålingene var ikke justert for instrumentets heading, så den omregningen har vi gjort. Tidspunktene var oppgitt i norsk normaltid. Det var derfor nødvendig å endre disse til UTC for å sammenholde med måledata for trykk.



3 VALG AV PERIODE FOR SAMMENLIKNING MED BEREGNINGER

Store signifikante bølgehøyder er antatt å gi størst miljølaster (stor belastning) på strukturen, og mulig stor bevegelse. For å sammenligne måledata og numeriske beregninger er det viktig at bølgene kommer fra en relativt stabil retning. Dette kan vurderes fra parameterne sprTp og Unidirecld som indikerer hvor stor spredning det er i bølgeretningen. Ved sammenlikning med beregninger fra Ansys AQWA brukes en bestemt retning for bølgene. Hvis det er stor spredning i bølgeretningen i målingene, vil vi ikke sammenlikne «like» systemer.

I Figur 7 er H_m0 for hele måleperioden plottet for å kunne finne de periodene hvor den signifikante bølgehøyden er størst. I figuren er det også merket av om dette er en stabil periode.

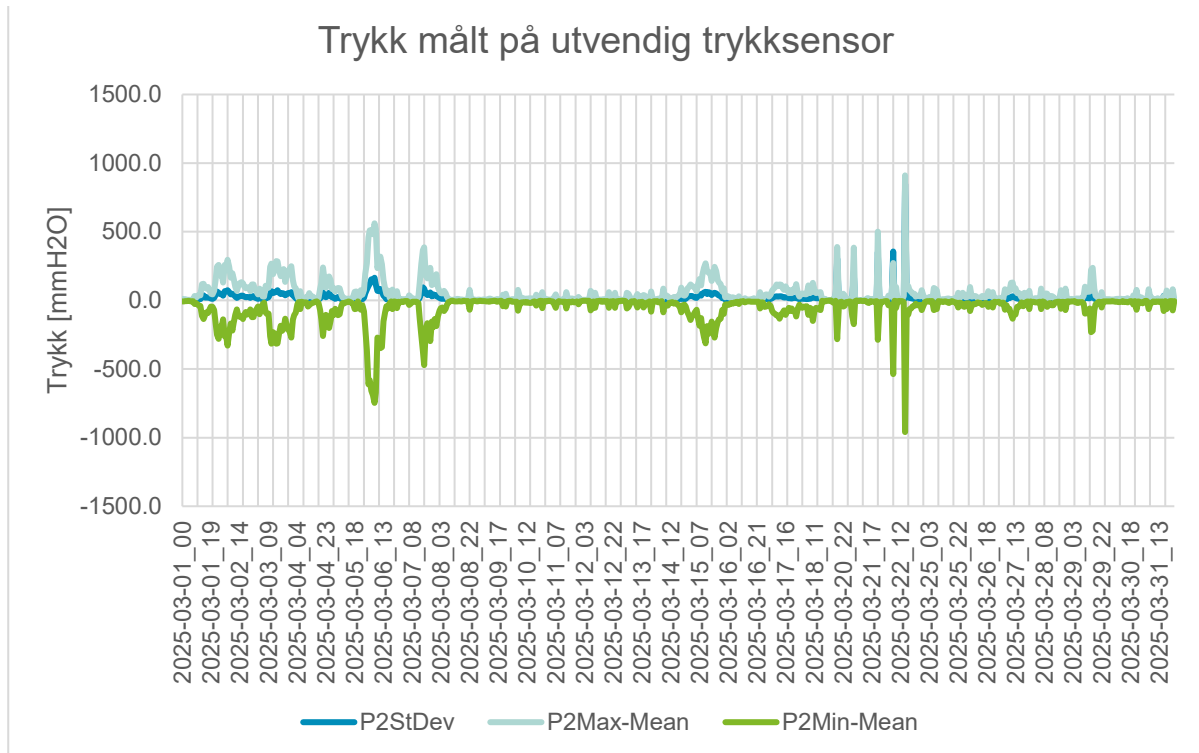


Figur 7: Måledata for signifikant bølgehøyde for perioden 06.05.2024-08.04.2025.

I Figur 7 er periodene med størst signifikant bølgehøyde markert med røde ringer. Periodene som skiller seg ut er tidlig i november 2024 (01.11.2024 til 03.11.2024), to perioder i hhv. desember og starten av januar (16.12.2024 og 03.01.2025). Det siste punktet er i begynnelsen av mars (05.03.2025 til 06.03.2025). Dessverre manglet det måledata for trykk på donuten i starten av november. De to periodene med størst signifikant bølgehøyde målt i desember og januar har lav spredning. Periodene har tre timer med store signifikante bølger.

Figur 8 viser trykkdata for mars. Sensorene måler totaltrykk som inkluderer lufttrykk. Figuren viser det maksimale (P2Max-Mean) og minimale (P2Min-Mean) utslaget i trykk fra en gjennomsnittsverdi for den utvendige sensoren. Gjennomsnittsverdien er beregnet for hver time for å ta hensyn til variasjon i lufttrykk. Standardavviket for hver timesserie med målinger er også vist (P2SDev). Det maksimale utslaget vil skyldes at bølgetopper treffer donuten og gir økt vannhøyde over sensoren. Det minimale utslaget skyldes at bølgedaler treffer donuten.

Det er noen tilfeller av store utslag i perioden 18. til 22. mars, men disse er kortvarige. 6. mars har store signifikante bølgehøyder, lav spredning i retning, og flere timer med høy sjø (rundt seks timer). Vi har derfor valgt å bruke måledata fra 06.03.2025 i våre hydrodynamiske analyser.



Figur 8: Trykkprofil i mars måned [10].

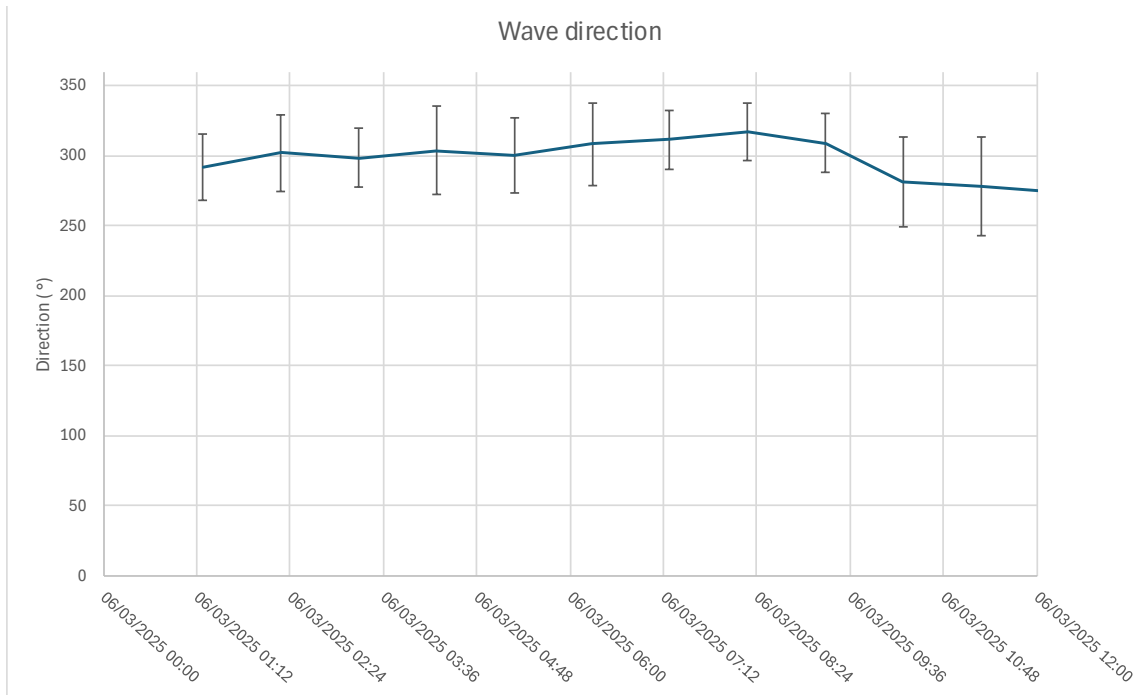
Vi startet med å midle data over 4 perioder, fra kl. 03.00 til kl. 07.17, men oppdaget at gjennomsnittshøyden av bølgene over de 4 periodene var lavere enn ved den siste enkelttiden. Vi valgte derfor å sammenligne målinger og beregninger for enkeltperioden (kl. 07.00 til 07.17) der bølgene var størst. Donuten hadde vært utsatt for liknende forhold i flere timer så vi antar at forholdene hadde hatt tid til å stabilisere seg.

Bølgemålingene ble foretatt i 17 minutter fra hver hele time. De resterende 43 minuttene i hver time ble det ikke målt. Måleresultatene er rapportert med samleverdier en gang per time (med klokkeslett satt 17 minutter etter hel (ved måleperiodens slutt)).

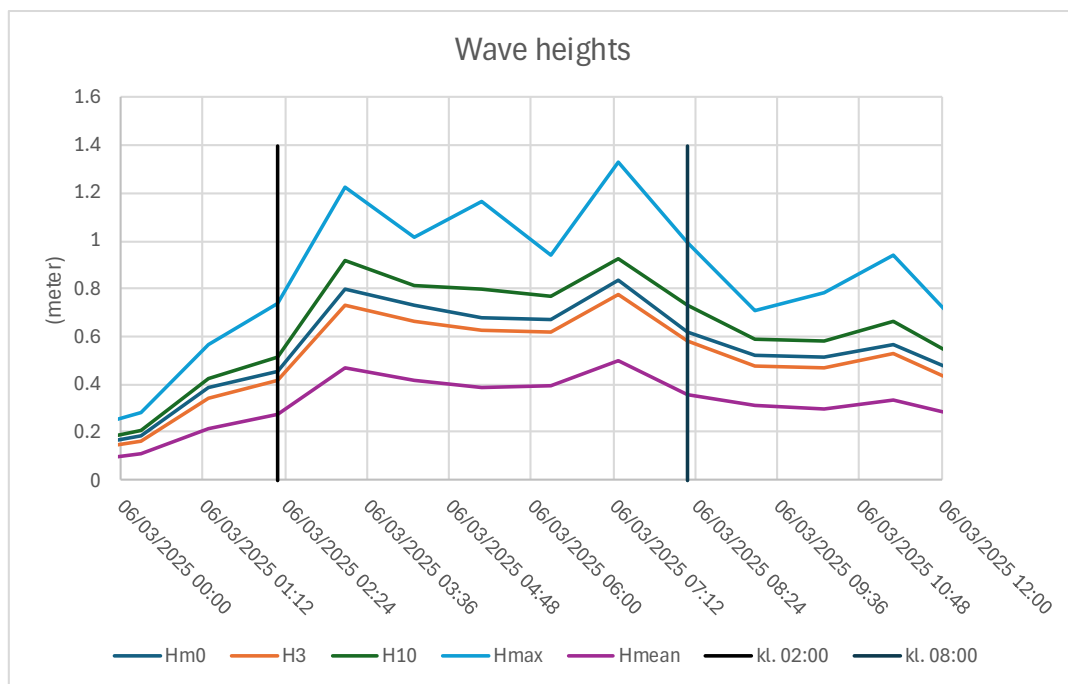
Dataene for enkeltperioden, 6. mars 2025 kl. 07.17 presenteres i kapittel 5.4. De midlete resultatene er samlet i Vedlegg B.

Figur 9 viser gjennomsnittlig bølgeretning i for første halvdel av 6. mars. Vi ser at bølgene kommer fra ganske lik retning hele perioden, og at variasjonen i retning ikke er stor.

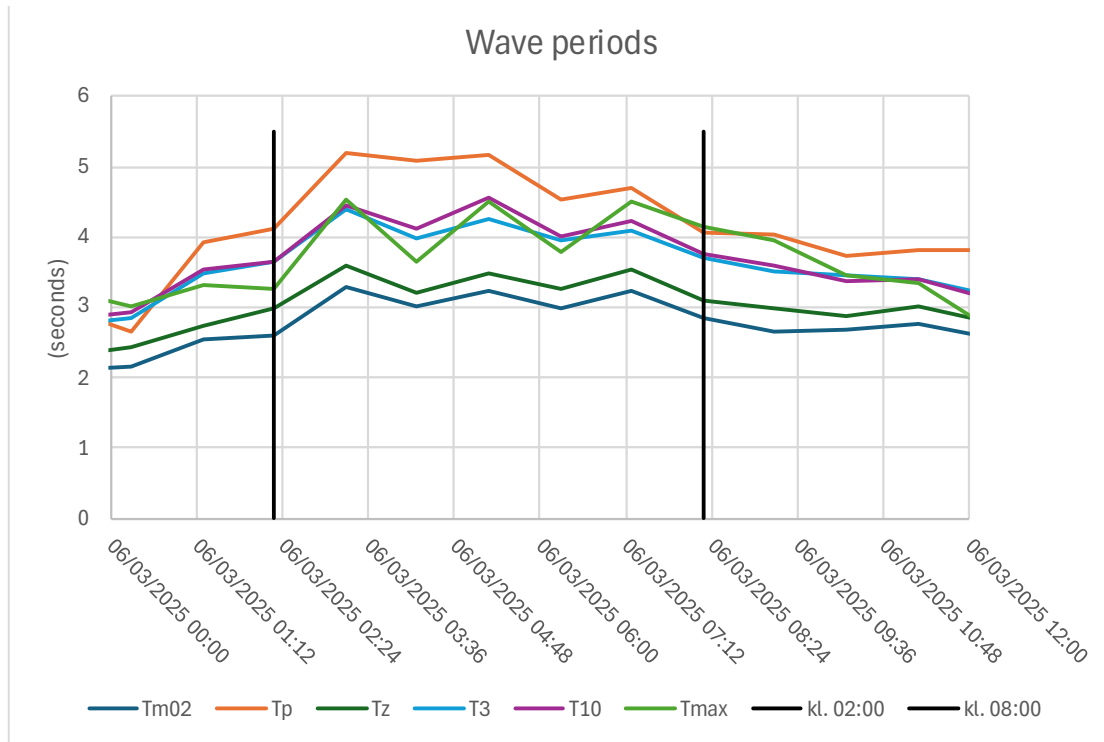
Figur 10 og Figur 11 viser målte bølgehøyder og bølgeperioder for perioden fra 6. mars 2025 kl. 00.00 til 6. mars 2025 kl. 12.00, med perioden 6. mars fra kl. 02.00 til kl. 08.00 markert med vertikale linjer. Bølgeperioden forteller noe om hvor bratte bølgene er. Dette har sammenheng med hvor mye energi hver bølge bærer med seg.



Figur 9: Bølgeretning vist med +/- 1 standardavvik for perioden 6. mars 2025 kl. 01.00 UTC til til 6. mars 2025 kl. 12.00 UTC. Verdiene er plassert 17 minutter etter helt klokkeslett.



Figur 10: Bølgehøyder for perioden fra midnatt til kl. 12.00 UTC. Perioden fra kl.02.00 til 08.00 er markert med vertikale linjer.



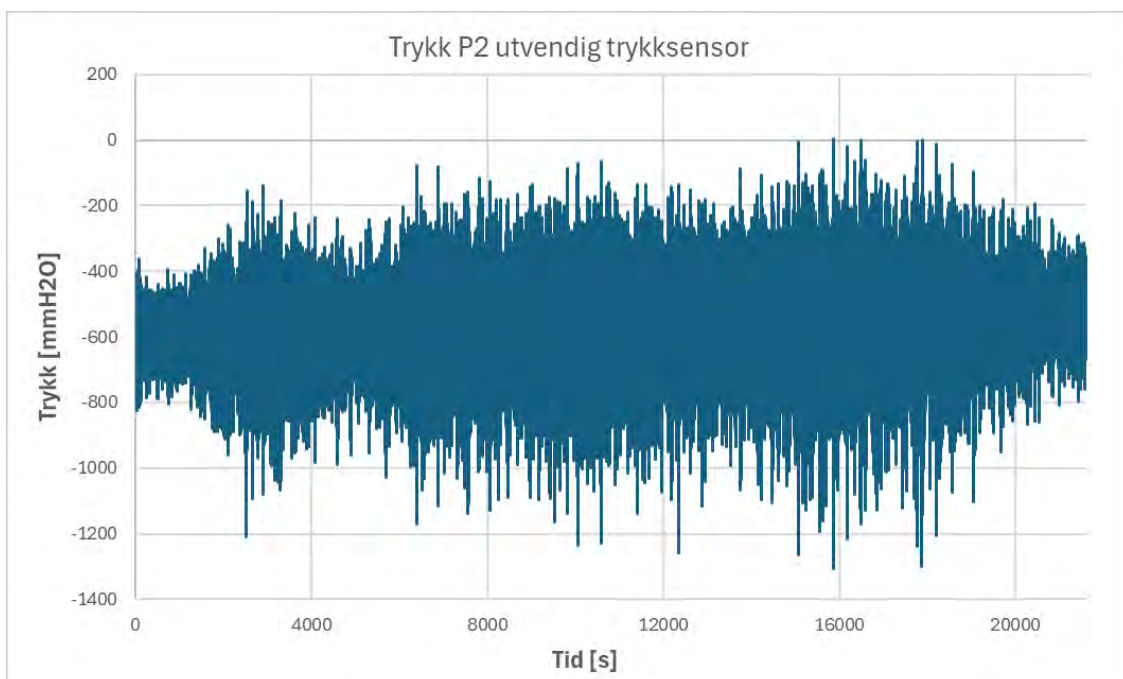
Figur 11: Bølgeperioder for perioden fra midnatt til kl. 12.00 UTC. Perioden fra kl. 02.00 til 08.00 er markert med vertikale linjer.

4 MÅLERESULTATER

4.1 Måledata for trykk

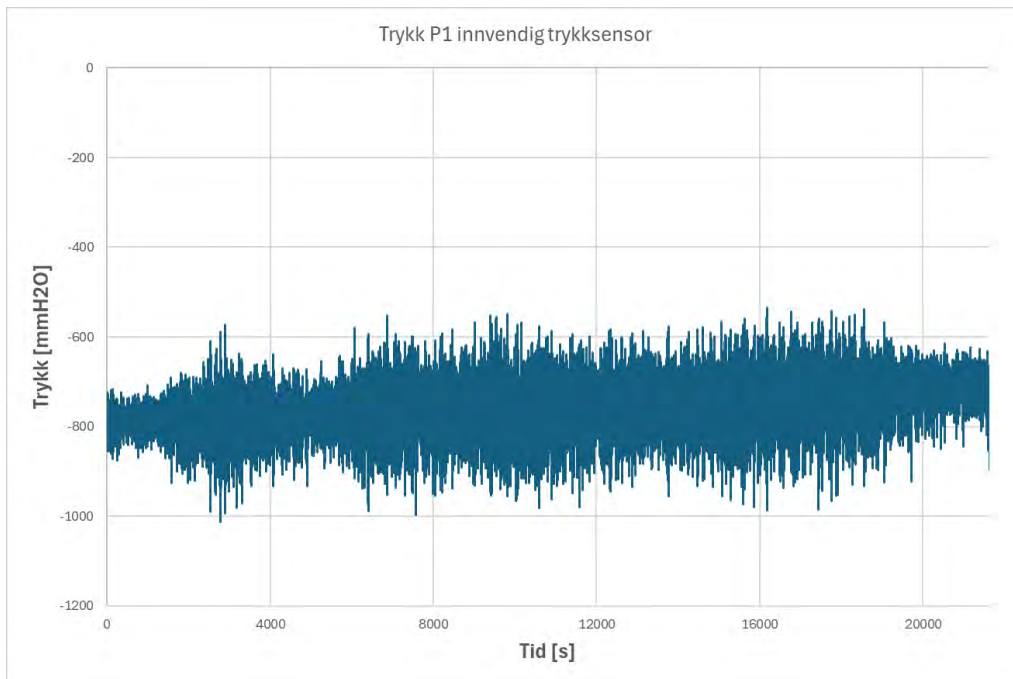
Som beskrevet i kapittel 2.2 er målt trykk logget hvert 0,05 sekund (20 Hz). Analysen av bølgeforholdene resulterte i at en periode fra 06.03.2025 ble valgt for å sammenligne målinger og beregninger. For denne perioden fikk vi oversendt detaljerte data time for time [8]. Disse dataene vil bli sammenliknet med numeriske analyser.

Figur 12 viser måleresultatene for den utvendige trykkmåleren for tidsrommet 03.00 til 09.00. I denne figuren er ikke gjennomsnittsverdien trukket fra. Målingene varierer derfor rundt en verdi på ca. -600 mm H₂O. Utslagene er mindre den første tiden, så er de stabilt store en lang tid, og så avtar de i størrelse mot slutten av perioden.



Figur 12: Trykkprofil 6. mars 2025 kl. 03-09.

Figur 13 viser måleresultatene fra den innvendige trykkmåleren for tidsrommet 03:00 til 09:00. I denne figuren er gjennomsnittsverdien ikke trukket fra, og målingene varierer derfor rundt en verdi på omtrent 800 mm H₂O. Trykkutslagene følger en lignende trend som det utvendige trykket, noe som er forventet siden turbulens og strømming inne i tanken er direkte påvirket av miljøforholdene utenfor. Trykksvingningene innvendig er imidlertid noe lavere, noe som er naturlig ettersom det skjer et energitap fra de ytre miljøforholdene til slåssing inne i tanken.

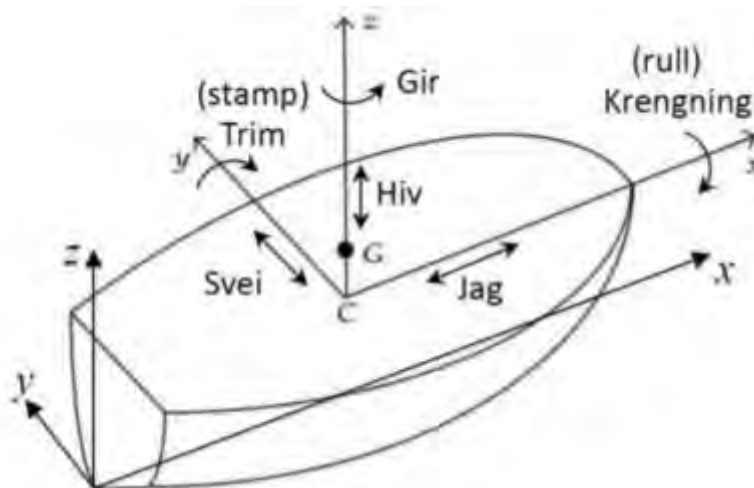


Figur 13: Trykkprofil innvendig 6. mars 2025 kl. 03-09.

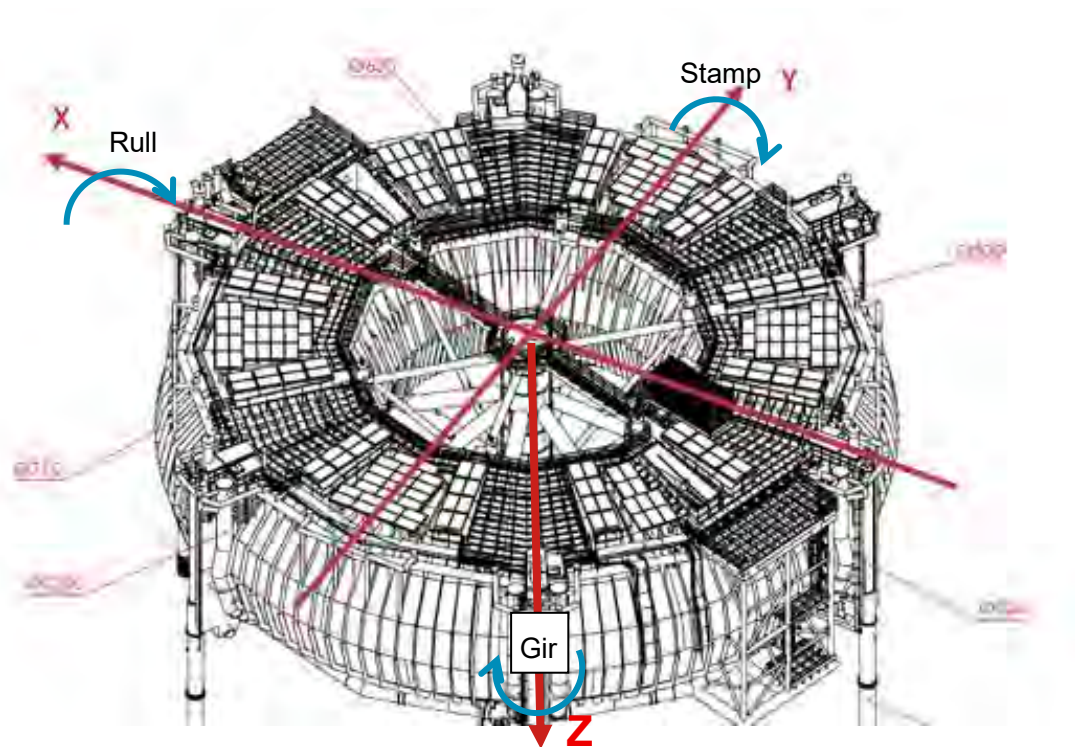
4.2 Bevegelser

Donuten har 6 frihetsgrader for bevegelse. Den kan forflyttes langs de 3 koordinataksene, og den kan rotere/vippe rundt de 3 koordinataksene.

Figur 14 viser de 6 frihetsgradene på et skip. For skip og fly defineres ofte x-aksen som forover, y-aksen mot styrbord, og z-aksen nedover. MD har ikke noen retning som naturlig kan defineres som forover eller sideveis. Jag og svai blir derfor definert langs hhv. x- og y-akser i horisontalplanet. Figur 15 viser aksene med aksene og rotasjonene for donuten. X-aksen ble valgt basert på de høye sylindrene/inntakspumpene på strukturen (benyttet som siktelinje). Tilsvarende blir stamp og rull rotasjoner om de to aksene i horisontalplanet. Koordinattransformasjonen for at de målte verdiene kan sammenlignes med beregningene er beskrevet i kapittel 5.6.



Figur 14: De 6 frihetsgradene vist på et skip. Figuren viser et koordinatsystem der z-aksen er rettet oppover. I mange tilfeller er den rettet nedover.



Figur 15 x- og y-aksene for IMU tegnet inn på modellskisse. Figur fra Sintef [8].

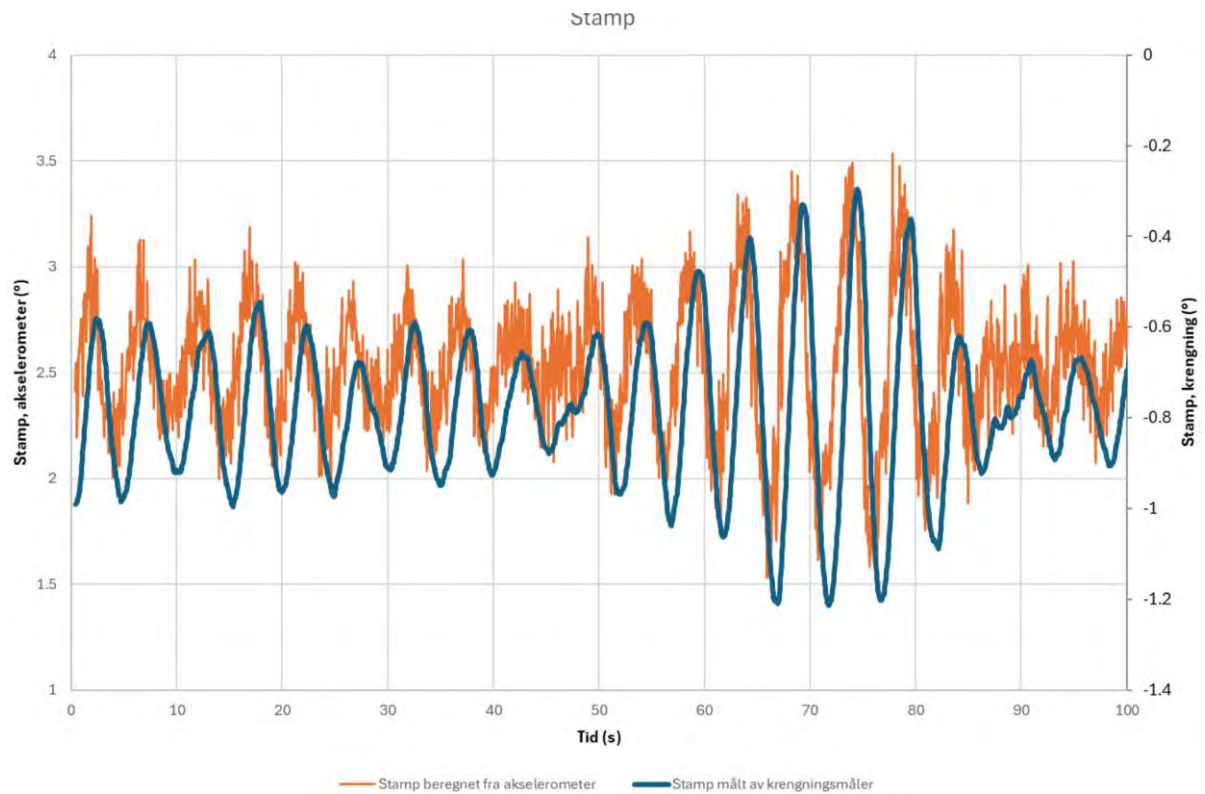
4.3 Bevegelsesmålinger

4.3.1 Akselerometer og krengningsmåler

IMU instrumentet rapporterte akselerasjon i de 3 retningene og rotasjon om de to horisontale aksene med 20 Hz frekvens. Alle akselerasjonene er målt med et akselerometer, mens rotasjonene er også målt med en krengningsmåler [4].

Ved å se på en kort periode, ref. Figur 16, ser vi at krengningsmåleren gir en «glatt» kurve mens akselerometeret ser ut til å plukke opp mer «støy». Vi ser at de lokale toppene for kurvene kommer med samme frekvens, men at toppene er litt forskjøvet relativt. Målingene er vist på hver sin vertikale akse for at utslagene skal vises.

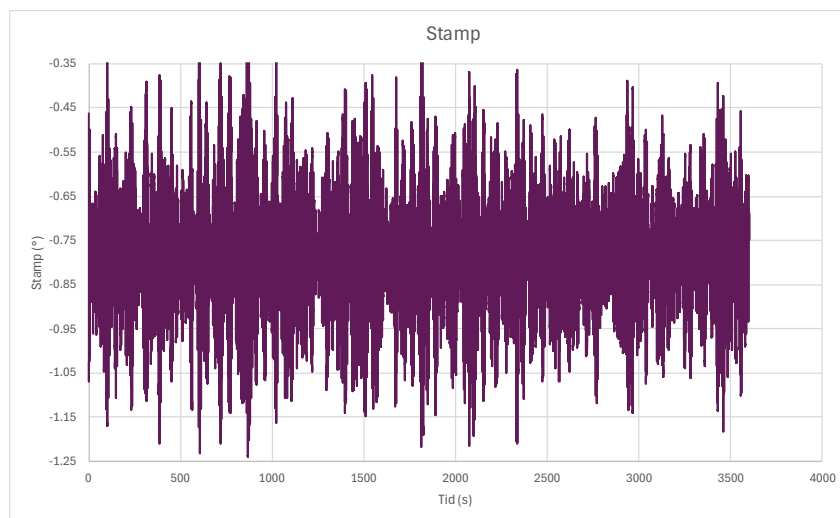
For sammenligning av stamp- og rullbevegelsen benyttes krengningsmålerens utslag. Da unngår vi å forholde oss til fluktuasjonene som akselerometeret fanger opp («støyen»).



Figur 16: Måleserier fra akselerometer (beregnet) og krenningsmåler.

4.3.2 Stamp og rull

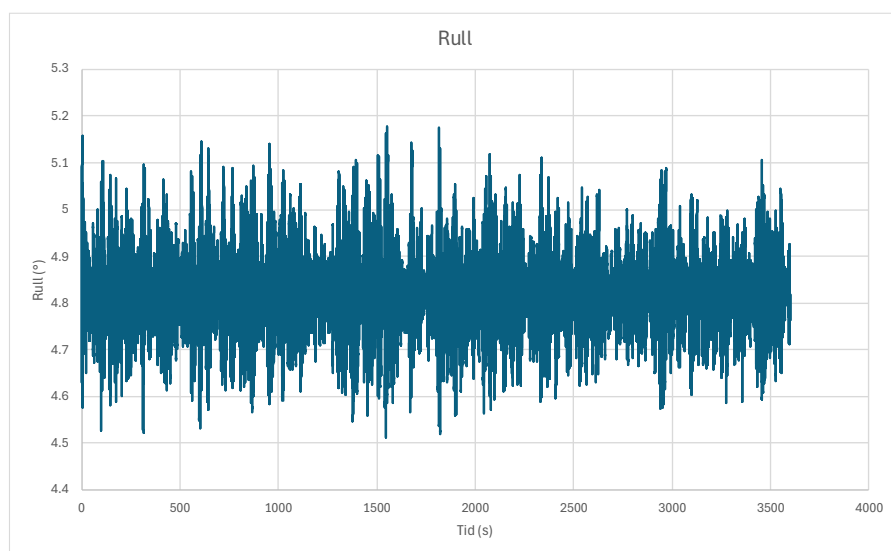
Figur 17 viser stamp (rotasjonen om y-aksen i instrumentets aksestystem) i en time. Gjennomsnittsverdien er $-0,8^\circ$, med et standardavvik på 0,14. Avviket fra det ideelle balansepunktet med rotasjon om 0° er sannsynligvis knyttet til instrumentets kalibrering.



Figur 17: Stampbevegelsen i en time fra 06.03.2025 kl. 06.37 (norsk normaltid).



I Figur 18 ses rullebevegelsen, altså rotasjonen rundt x-aksen i instrumentets aksessystem. Gjennomsnittsverdien for rull-målingene er $4,8^\circ$, og standardavviket er rundt $0,1^\circ$. En gjennomsnittsverdi på $4,8^\circ$ indikerer at instrumentet ikke er i vater relativt til donuten. Donuten kan ligge litt skjevt i vannet p.g.a. ujevn stramming av fortøyninger eller andre forhold. Det er dog ikke sannsynlig at donuten har hatt en vinklet posisjon på $4,8^\circ$ da dette ville påvirket arbeidsforholdene vesentlig, og donuten ville oppleves veldig skjev. Igjen er sannsynligvis avviket fra balansepunktet 0° knyttet til instrumentets kalibrering.



Figur 18: Rullebevegelsen i en time fra 06.03.2025 kl. 06.37 (norsk normaltid).

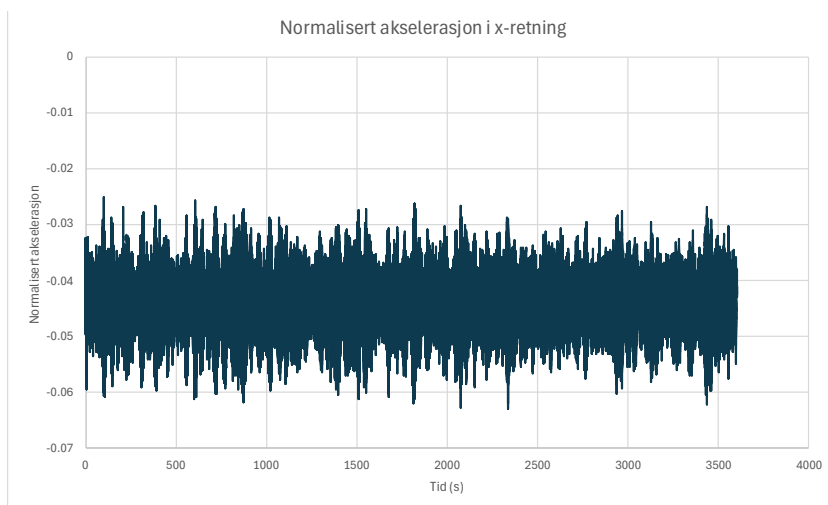
Lengden av den vertikaleaksen er lik i Figur 17 og Figur 18. Vi ser da at stampbevegelsen har større utslag enn rullebevegelsen. Dette er som forventet.

4.3.3 Normalisert akselerasjon i instrumentets horisontal- og vertikalplan

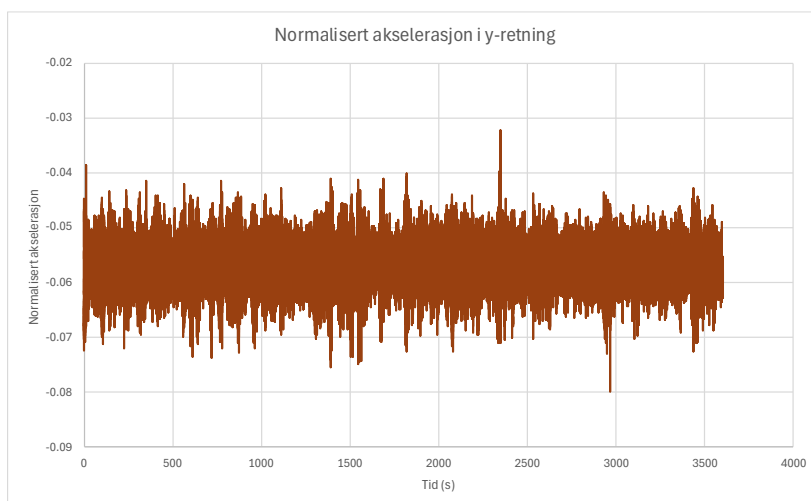
Akselerometeret måler total akselerasjon. Gravitasjonen er inkludert i akselerasjonen. Excel-filene oppgir at akselerasjonen er målt i m/s^2 . Verdiene er normalisert slik at total akselerasjon er 1. For å finne reell akselerasjon i de ulike retningene må derfor verdiene multipliseres med gravitasjonen på $9,8 \text{ m/s}^2$.

Figur 19 og Figur 20 viser målt normalisert akselerasjon i x-retning og y-retning i en time. Begge figurene har samme utstrekning av y-aksen. Begge de normaliserte akselerasjonene fluktuerer rundt gjennomsnittsverdier på hhv. $-0,044$ og $-0,057$. Det indikerer at instrumentet ikke er i vater relativt til donuten.

Standardavviket for akselerasjonen er på $0,046 \text{ m/s}^2$ i x-retning og $0,037 \text{ m/s}^2$ i y-retning. Visuelt er typisk utslag (normalisert) på $\pm 0,01$ i x-retning og litt mindre i y-retning.



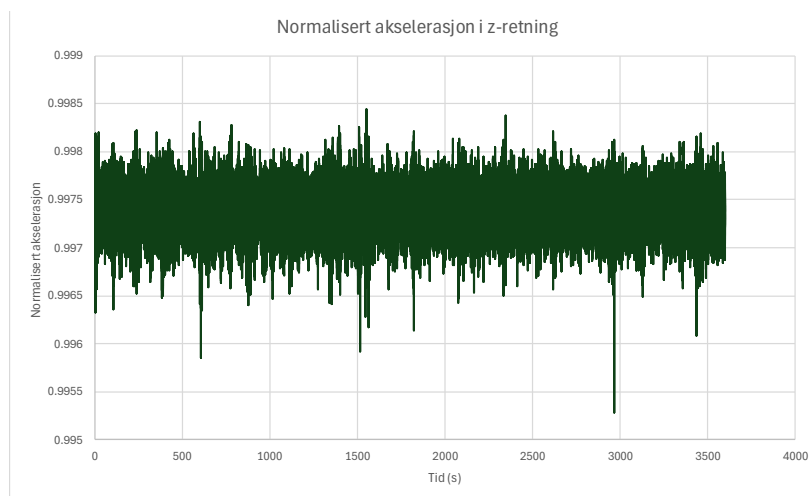
Figur 19: Normalisert akselerasjon i x-retning i en time fra 06.03.2025 kl. 06.37 (norsk normaltid).



Figur 20: Normalisert akselerasjon i y-retning i en time fra 06.03.2025 kl. 06.37 (norsk normaltid).

Akselerometeret er plassert langt utenfor gravitasjonssenteret for donuten. Gravitasjonssenteret ligger i senter av strukturen. Akselerasjonen i z-retning vil derfor inkludere effekten av vertikal bevegelse som skyldes vipping (stamp/rull) av donuten.

Figur 21 viser normalisert akselerasjon i z-retning. På grunn av gravitasjonen er verdien nær 1, men litt redusert på grunn av instrumentets skjevstilling. Hvis instrumentet hadde stått vattret ville akselerasjonen variert rundt 1,0. Standardavviket for normalisert akselerasjon er svært liten 0,0002. Omgjort til akselerasjon er standardavviket på 0,002 m/s², noe som tilsier liten vertikal bevegelse av donut, også kalt hiv.



Figur 21: Normalisert akselerasjon i z-retning i en time fra 06.03.2025 kl. 06.37 (norsk normaltid).

4.4 Usikkerhetsmomenter rundt målinger

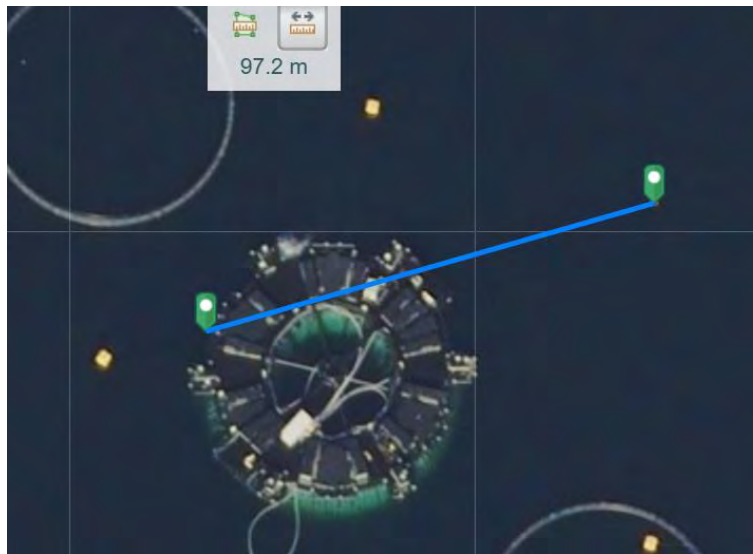
Lokasjonene av både IMU og trykksensor er ikke eksakte. Vi har brukt bilder, tegninger og kommunikasjon med Sintef [8] og Åkerblå [5] for å bestemme plasseringen av måleutstyret.

Krengningsmåleren måler samme krengning uavhengig av posisjon. Rull og stamp er oppgitt relativt instrumentets definerte x- og y-akser. Verdiene må derfor regnes om til rull og stamp relativt koordinatsystemet i AQWA for å kunne sammenlignes.

Både Sintef [8] og SalMar [6] har fortalt at IMU er lokalisert i konteineren. Basert på bilder har vi vurdert plasseringen av konteineren. Beskrivelse av plassering og omregning av måledata er gjort i kapittel 5. Konteineren er stor, så vi har valgt å plassere sammenlikningspunktet nær midten av konteineren.

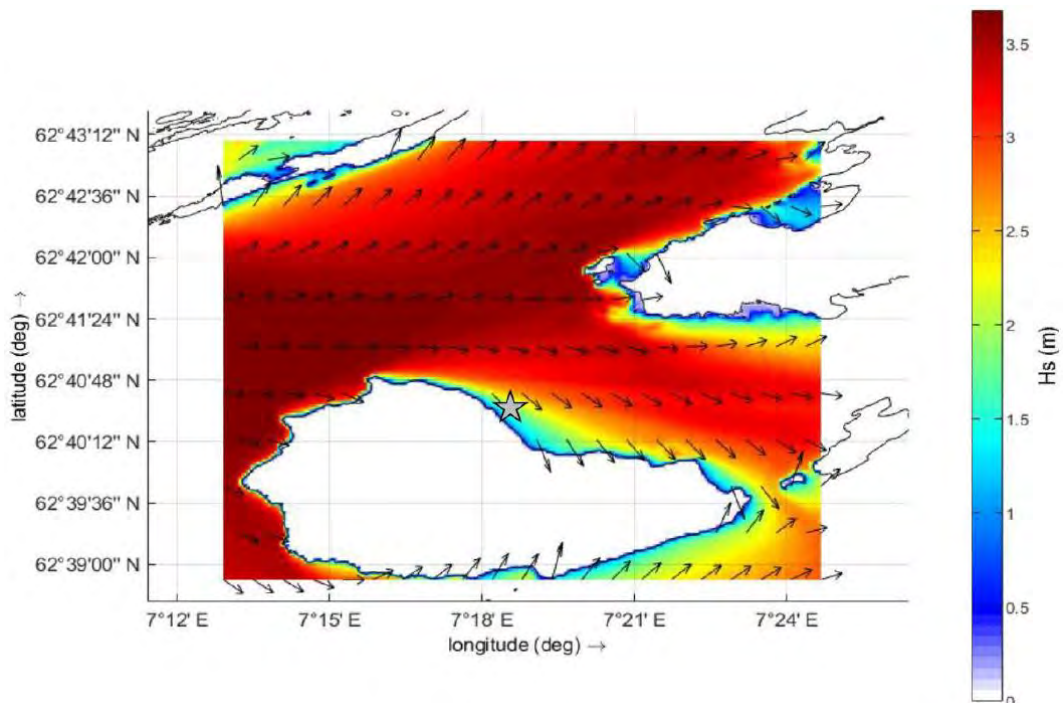
Lokasjonen til trykksensoren ble bestemt basert på Sintefs rapport [2]. Der vises det at sensoren er plassert mot vest-nordvest-siden av Marine Donut. Fra Figur 2 vises det at sensoren sitter nær en av lukene. Punktet vi valgte for å sammenligne ble valgt i samme retning, og ved et dyp bestemt fra det målte trykket.

Bølger og strøm er målt ved en posisjon nordøst for donuten som vist i Figur 6. Figur 22 viser at avstanden mellom bølgemåleren og trykksensoren ser ut til å være ca. 100 meter, målt på flyfoto.



Figur 22: Avstand mellom bølge- og strømmåler og trykksensor. Målt med Norge i bilder sitt måleverktøy. Bilde fra norgebilder.no.

Åkerblås lokasjonsrapport har vist hvordan vindbølgene spres mot anlegget ved vestavind, ref. Figur 23. Slik spredning kan føre til at målt bølgeretning ikke er helt den samme som den som treffer donuten. Bølgebetingelsene som er valgt kan derfor avvike noe fra realiteten.



Figur 23: Vindbølgespredning mot anlegget (vist med grå stjerne) for 50-årsbølger med vind fra vest. Bilde fra lokalitetsrapport [3].

5 KOORDINATTRANSFORMASJONER AV MÅLEDATA

5.1 Introduksjon

For å kunne sammenlikne måledata med resultatene fra beregningene må posisjoner og retninger være plassert i samme koordinatsystem.

Beregningene er gjort med programvaren AQWA fra Ansys. Dette er den samme programvaren som ble brukt til hydrodynamiske analyser i den forrige rapporten [1]. Modelloppsett og resultater presenteres i kapittel 6 og 7.

Bølge- og strømretninger som skal brukes som input til beregningene må også være tilpasset orienteringen av modellen. Modellen er satt opp med forankring i 4 retninger. Vi har valgt å la disse sammenfalle med forankringsretningene for anlegget for at resultatene ikke skal påvirkes av ulik forankringsretning.

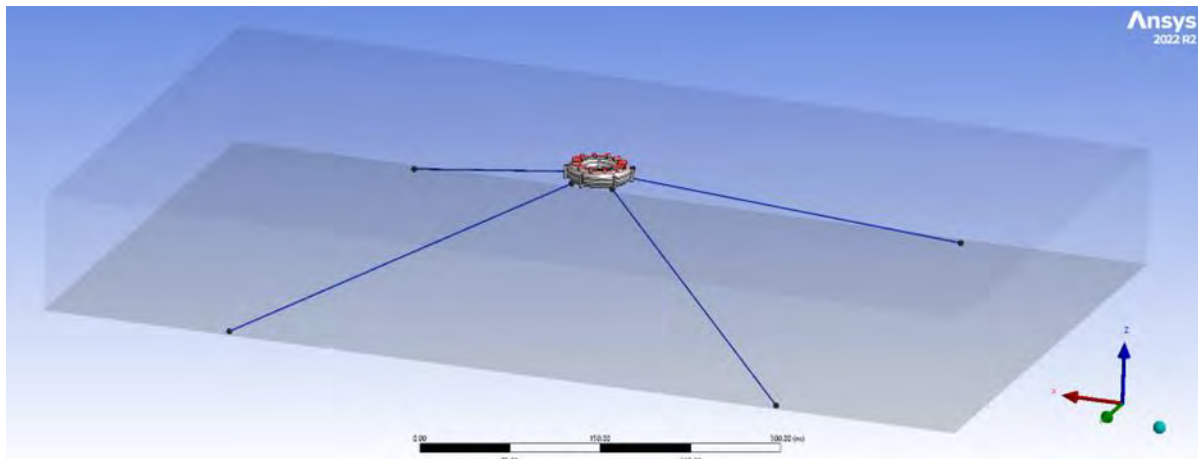
5.2 Posisjonering av anlegget

Anleggets retningsposisjonering i virkeligheten er sammenlignet med retningen brukt i beregningene i Ansys AQWA. Dette er så brukt til å bestemme bølge- og strømretning slik de skal settes i AQWA. Anlegget ligger i kompassretning 317° målt ut fra nordlige merkepunkter (de gule).

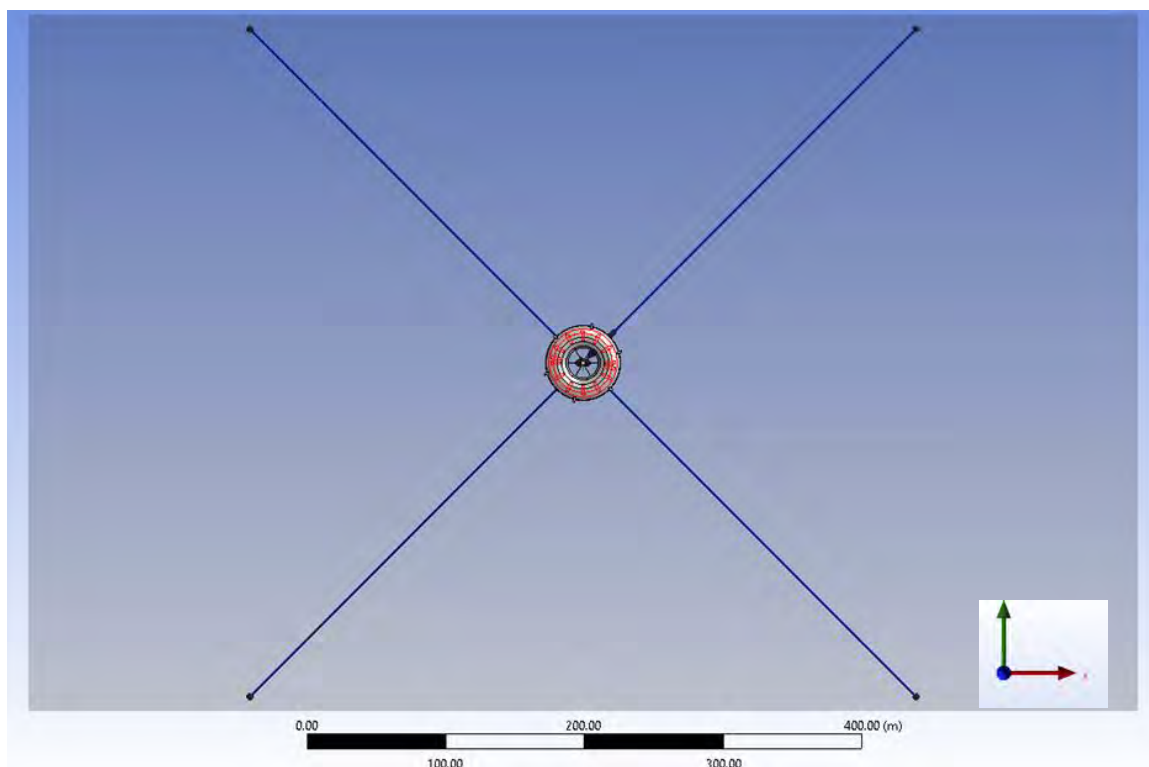


Figur 24: Oppdrettsanlegget ved Seterneset med Marine Donut i midterste posisjon (Bur 3). Bilde fra Norgebilder.no.

Modellen i AQWA er plassert i et domene der retningen er gitt ved x og y. Donut er plassert midt i domenet med symmetriske ankerfester, se Figur 25 og Figur 26. De blå linjene er ankerlinjer. Det vil si at x-retning i modellen er langs anleggets lengderetning (målt til kompasskurs 317°). Positiv x-retning ble valgt mot sørøst, altså i kompassretning 137°. For at modellen skal ha samme orientering som anlegget må den derfor roteres 43° med klokka.



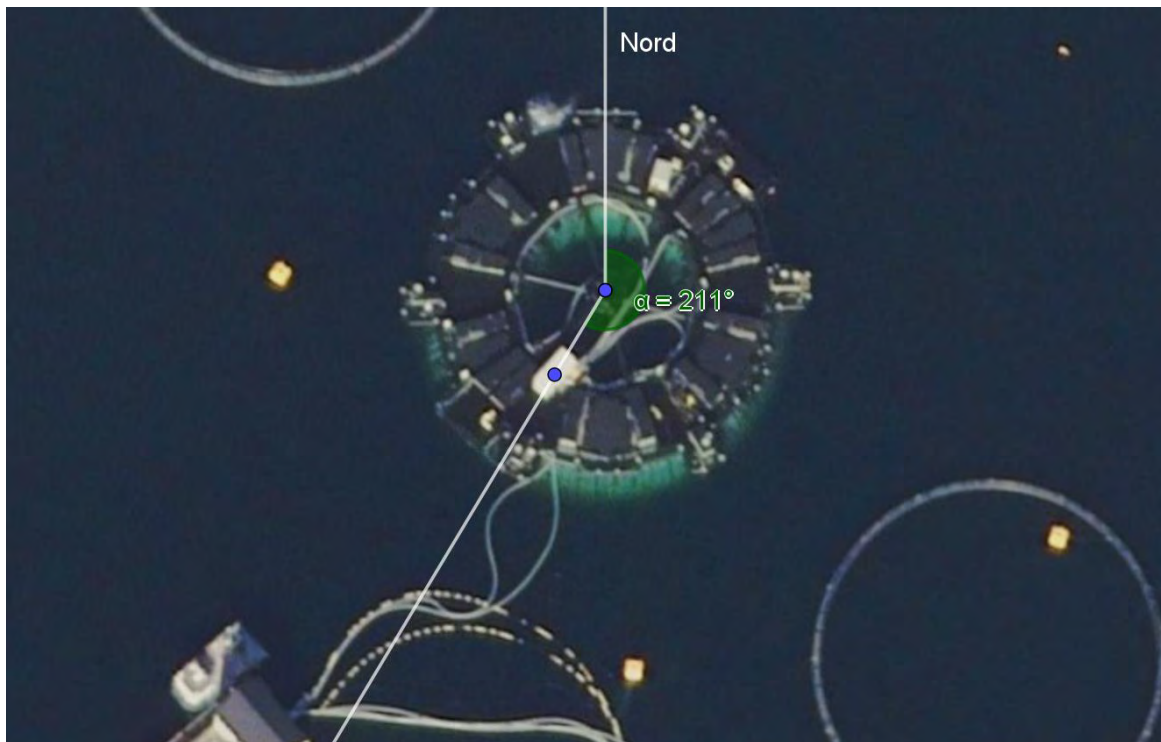
Figur 25: AQWA modellen sett i perspektiv.



Figur 26: AQWA modellen plassert i eget koordinatsystem.

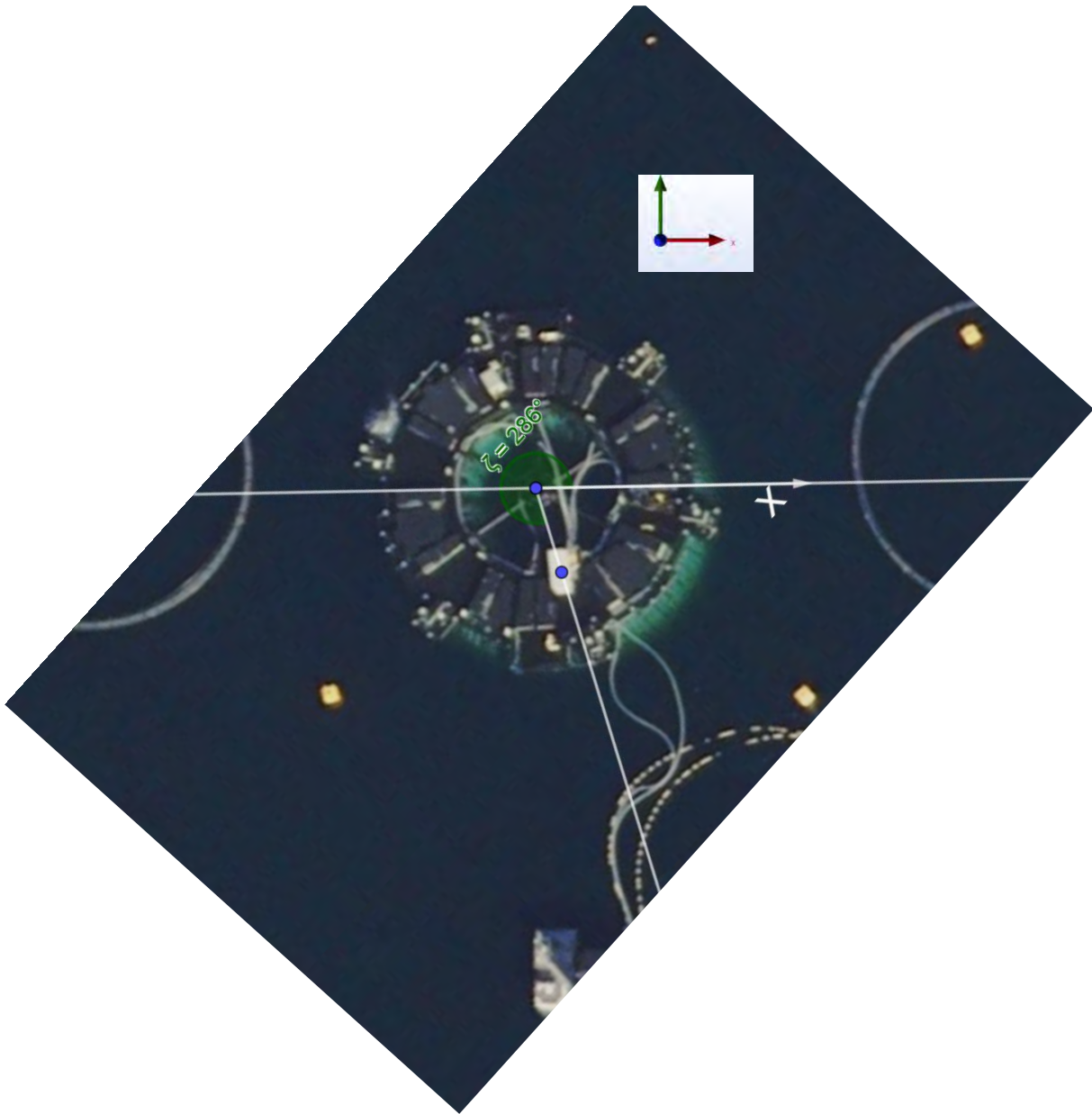
5.3 Plassering av lastkonteiner med måleutstyr

Akselerometeret og krengningsmåleren er plassert i den hvite konteineren. Denne er plassert mot land. Ved å måle på flyfoto fant vi at konteineren er plassert ved kompassretning 211° relativt donutens senter, som vist i Figur 27.



Figur 27: Flyfoto med markering av nord og konteinerposisjon (mot land). Kompassretningen for konteineren er omtrent 211°.

Ved å definere positiv x-akse i sørøstlig retning langs anlegget fant vi at konteineren var plassert i vinkelretning 286° beskrevet matematisk fra positiv x-retning, som vist i Figur 28.



Figur 28: Plassering av konteiner relativt AQWA modellens koordinater, i posisjon 286°. AQWAs koordinatsystem er plassert i figuren, x-aksen og vinkelposisjonen er markert. Bildet er orientert i modellens retning.

5.4 Bølgemålinger

5.4.1 Bølgeretning

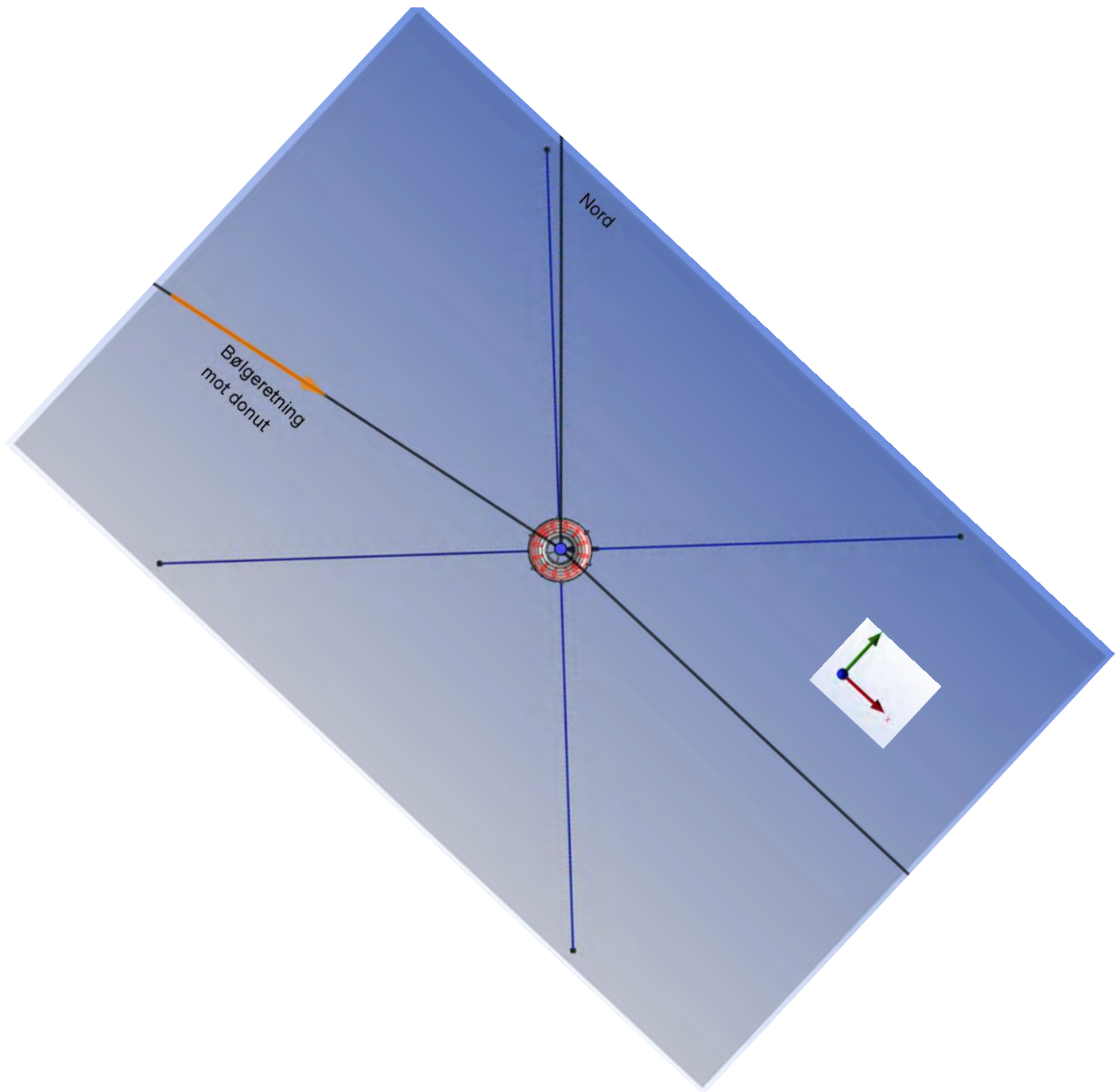
Måledataene oppgir retningen bølgene kommer fra, mens AQWA oppgir retning bølgen beveger seg i, altså motsatt definisjon. Måledataene forholder seg til kompasskurs, mens AQWA bruker matematisk standard for vinkler.

For perioden, 6. mars 2025 kl. 03.00 til 07.17 UTC, ble resultatene for bølgene midlet over de 4 periodene. Den gjennomsnittlige kompasskursen for bølgeretning (hvor bølgen kommer fra) er 303° . Figur 29 viser den midlete bølgeretning mot anlegget.



Figur 29: Bølgeretning 303° tegnet inn på flyfoto.

Omgjort til matematisk vinkelbeskrivelse og justert slik at modellen ligger i anleggets lengderetning vil bølgeretningen bli mot en posisjon mellom positiv x og positiv y. Omregnet til AQWAs koordinatsystem er retningen 10° som vist i Figur 30.



Figur 30: AQWA modellen orientert langs anleggets lengderetning. Bølgeretningen (10° i AQWAs koordinater) er markert på figuren. Nord er markert rett opp.



5.4.2 Bølgehøyde og -periode

De største bølgene ble registrert i perioden 6. mars 2025 kl. 07.00 til 07.17. Disse dataene er brukt til samsvarsvurdering med beregningene. Tabell 1 og Tabell 2 viser bølgehøyder og bølgeperioder som rapportert for perioden.

Signifikant bølgehøyde defineres enten som middelverdien av den tredjedelen av bølgene i en tidsserie som er størst (H3) eller basert på variansen av det nulte momentet av spekteret (Hm0). Åkerblå [5] anbefalte at Hm0, beregnet fra spekteret, ble valgt som signifikant bølgehøyde i stedet for H3. Disse verdiene, Hm0 og H3, er ofte ganske like. Maksimal bølgehøyde regnes å være mellom 1,8 og 1,9 ganger så stor som den signifikante bølgehøyden. Fra måledataene ser vi at det at forholdet mellom H3 og Hmax er 1,7, som er nærmere den oppgitte faktoren på forholdet mellom signifikant bølgehøyde og maksimal bølgehøyde.

Tabell 1: Gjennomsnittlige bølgehøyder for perioden 6. mars fra kl. 07.00 til kl. 07.17. Se fotnoter for forklaring av de ulike høydebegrepene.

Hm0 ¹	H3 ²	H10 ³	Hmax ⁴	Hmean ⁵
0.834	0.776	0.925	1.328	0.497

Tabell 2: Gjennomsnittlige bølgeperioder for perioden 6. mars fra kl. 07.00 til kl. 07.17. Se fotnoter for forklaring av de ulike begrepene.

Tm02 ⁶	Tp ⁷	Tz ⁸	T3 ⁹	T10 ¹⁰	Tmax ¹¹
3.248	4.703	3.535	4.09	4.232	4.509

Gjennomsnittlig bølgeretning for alle bølgene i perioden 6. mars 2025 kl. 07.00 UTC til 6. mars 2025 kl. 07.17 UTC er 310°, altså kommer bølgene fra en nordvestlig retning (Rent NV er 315°). Gjennomsnittlig bølgeretning for bølgene med størst energi er 312°. Standardavvik for bølgeretningen for bølger med størst energi i perioden er 21°.

Dette er nært orienteringen av anlegget (317°).

Forskjellen mellom gjennomsnittlig retning og retningen til de mest energirike bølgene er så liten at det trolig ikke vil utgjøre nevneverdig forskjell på beregningene.

¹ Signifikant bølgehøyde beregnet fra spekteret.

² Gjennomsnitt av største 1/3 av bølgene beregnet fra tidsserien.

³ Gjennomsnitt av største 10% av bølgene.

⁴ Største bølgehøyde i perioden.

⁵ Gjennomsnittlig bølgehøyde.

⁶ Gjennomsnittlig bølgeperiode basert på bølgespekteret.

⁷ Perioden ved maksimal energi i bølgespekteret.

⁸ Gjennomsnittlig nullkryssingsperiode.

⁹ Gjennomsnittlig periode for den høyeste tredjedelen av bølgene (H3).

¹⁰ Gjennomsnittlig periode for de 10% høyeste bølgene (H10).

¹¹ Perioden til den høyeste bølgen (Hmax).



Omregnet til AQWAs koordinatsystem har de energirike bølgene retning mot 5° , mens gjennomsnittet av alle bølgene har retning 7° . Det er retningen 7° som ble valgt som input til modellen. «Peak period», T_p , brukes som input til bølgefrequensen.

5.5 Strømmålinger

Målerne som målte retning og styrke for strømmen på 5 og 15 meters dyp var lokalisert nordøst for donuten, se Figur 6.

Målerne roterte under bruk. Målerne «heading», altså avvik fra nord, ble logget sammen med målingene. Det ble også registrert «pitch» (stamp) og «roll» (rull), altså rotasjon om de horisontale aksene, som ble brukt til å vurdere avvik fra vertikal posisjon. Avviket fra vertikal var generelt lite, og ses derfor bort fra.

Målingene har blitt korrigert basert på hver enkelt målings «heading». Det er kun korrigerte retninger som presenteres her.

Bølgedata fra periodene kl. 03.00-07.17 har blitt midlet i Vedlegg B. Midlete strømmålinger fra den samme perioden presenteres i samme vedlegg.

Bølgedataene for 6. mars 2025 mellom kl. 07.00 og 07.17 UTC viste store bølger. Resultatene for denne korte perioden er derfor trukket ut for analyse og presenteres her.

Strømretningene relativt anlegget og modellen er vist i Figur 31 og Figur 32.

5 meters dyp

For perioden 6. mars 2025 kl. 07.00 til 07.17 UTC var gjennomsnittlig kompassretning for strøm ved 5 meters dyp 202° . Det vil da si at vannet ved 5 meters dyp strømmet i en sørlig retning, med en liten vestlig komponent, mot land i denne perioden.

Gjennomsnittshastigheten var 9,6 cm/s. Hastigheten varierte mellom 7,8 og 11,4 cm/s (standardavviket var 2,5 cm/s).

Omgjort til vinkelkoordinat i AQWA er vannstrømmens retning 291° . Vannet strømmet mot sør med en liten vestlig komponent (mellom negativ x-retning og negativ y-retning i AQWA).

15 meters dyp

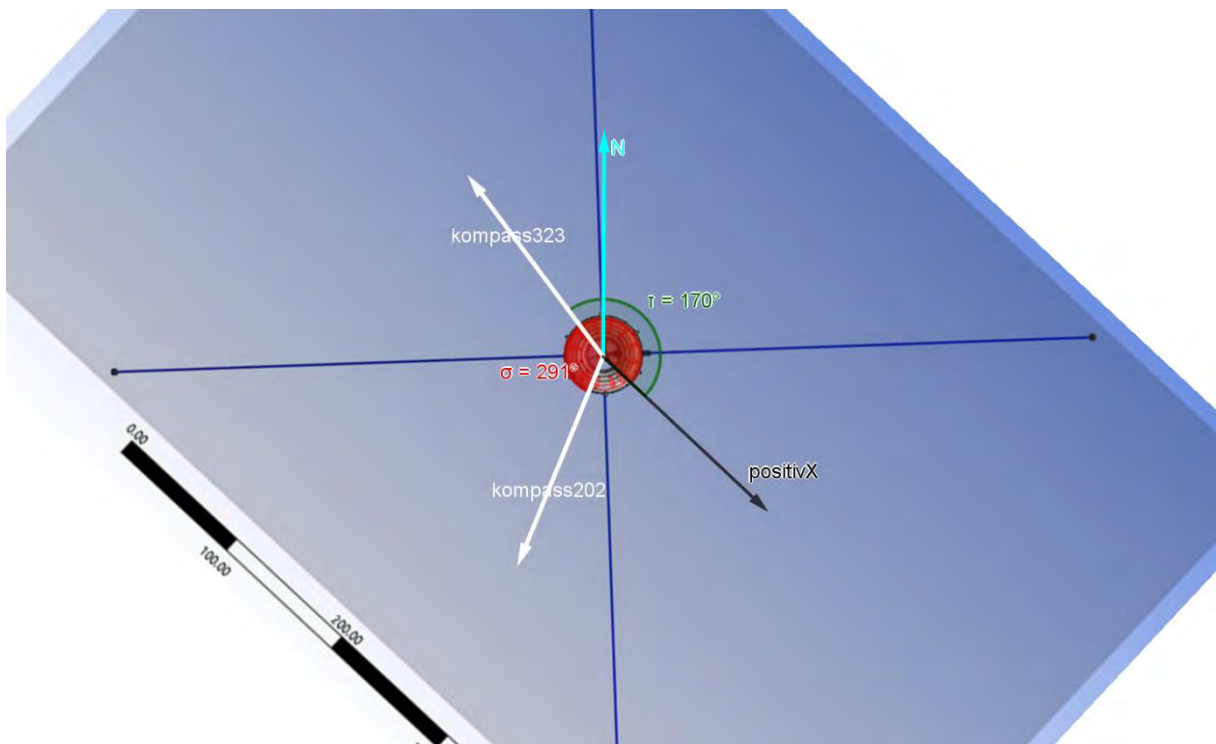
For perioden 6. mars 2025 kl. 03.00 til 07.17 UTC var gjennomsnittlig kompassretning for strøm ved 15 meters dyp 323° . Det vil da si at vannet ved 15 meters dyp strømmet i en nordvestlig retning, omtrent langs land i denne perioden. Det kan passe med ebbende sjø, ref. tidevannsdiskusjon i Vedlegg B.

Gjennomsnittshastigheten var 12,2 cm/s. Hastigheten varierte mellom 10,9 og 13,5 cm/s (standardavviket var 1,8 cm/s).

Omgjort til vinkelkoordinat i AQWA er vannstrømmens retning 170° . Vannet strømmet mot nordvest med en liten vestlig komponent (ganske nær negativ y-retning i AQWA).



Figur 31: Strømretningene ved 5 meters (202°) og 15 meters (323°) dyp for perioden kl. 07.00-0800.

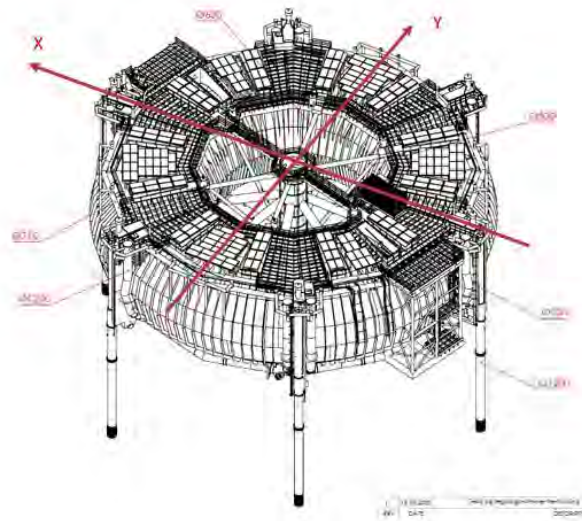


Figur 32: Strømretningene omgjort til AQWA-retninger for perioden 07.00 til 0800 UTC 6. mars 2025.

5.6 Orientering av akselerometer/IMU

For skip eller fly er akselerometer orientert med x-aksen framover. MD har ingen naturlig definert retning framover, så instrumentets orientering var ikke kjent.

Sintef informerte om at retning for x-aksen for IMU instrumentet var orientert mellom to av de høye sylindrene som er plassert på maskinrommene [8]. Figur 33 viser aksene tegnet inn på en skisse av MD, og Figur 34 viser siktelinje fra kontaineren langs x-aksen.



Figur 33: x- og y-aksene for IMU tegnet inn på modellskisse [8].

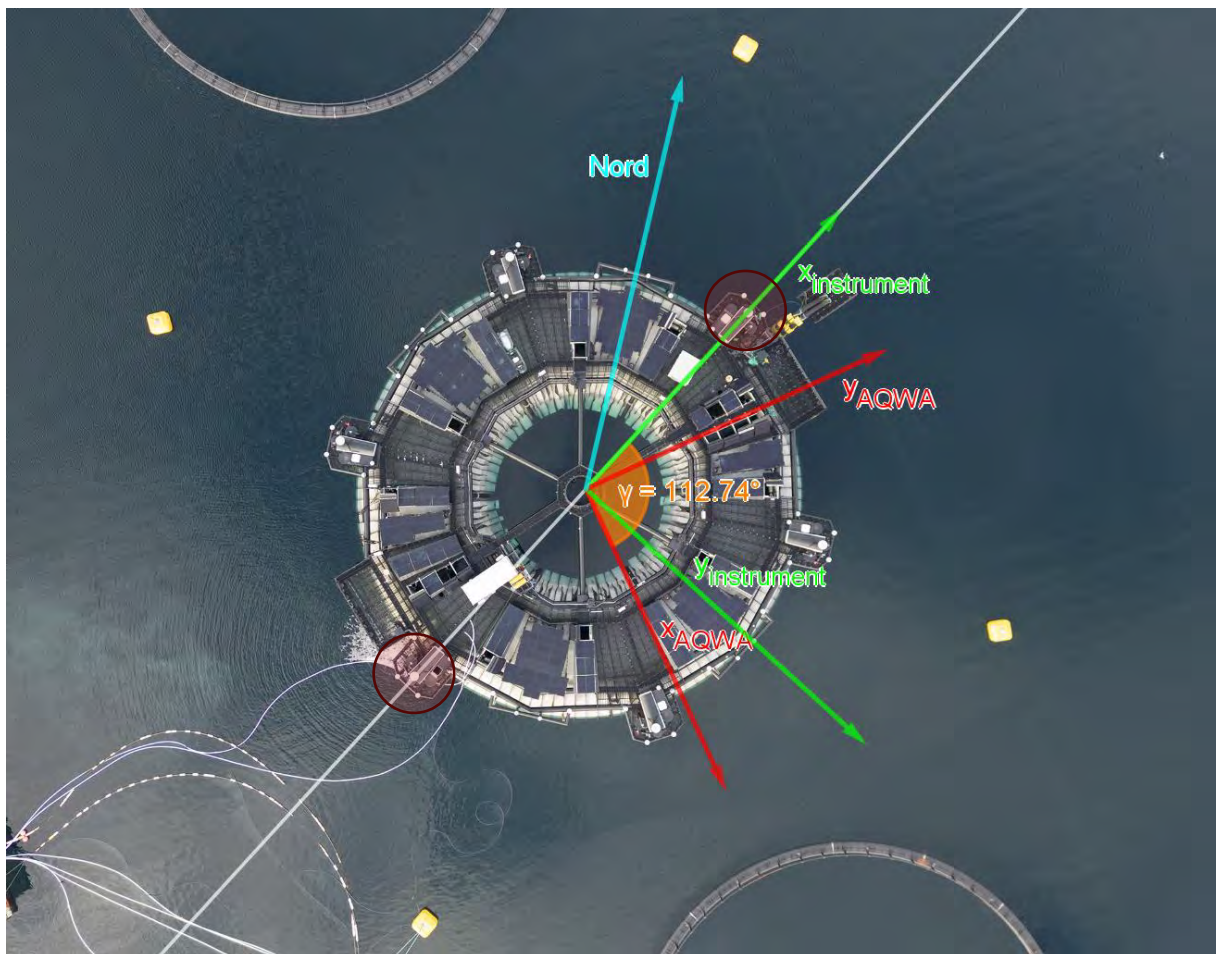


Figur 34: Siktelinje mot positiv x for IMU. Sylindren er markert med en rød oval [8].

Basert på informasjon fra Sintef [8] om retning for x- og y-akser for instrumentet er disse tegnet inn på bildet i Figur 35. Anleggets retning (AQWA-modellens x-retning) er estimert basert på nabomerdene. Retningene og forholdet mellom dem er vist i Figur 35.

Merk at instrumentets z-retning er nedover, mens z-retning i AQWA er oppover. Instrumentet viser gravitasjon som positiv, mens AQWA viser gravitasjon som negativ.

Ved å måle vinkelen mellom instrumenters x-retningen og AQWAs x-retning fant vi at instrumentet må roteres $112,7^\circ$ med klokka for at x-retningene skal sammenfalle.



Figur 35: MD med aksestystem for instrument og AQWA-modell. Sylindrerne er markert med røde sirkler.

Rotasjonen mellom aksestystemene er kun $22,7^\circ$ unna 90° . Det betyr at rull- (om x-aksen) og stamp- (om y-aksen)-retningene omtrent byttes om. Det samme gjelder jag (i x-retning) og svai (i y-retning).

5.6.1 Omregningsprosedyre

Avviket fra vertikalitet er noen få grader. Omregningen av akselerasjon til AQWA-koordinater gjøres derfor med en enkel transformasjon i x-y-planet i stedet for en full transformasjon som inkluderer alle aksene.



Instruments koordinatsystem roteres først 180° om x-aksen slik at z-aksen rettes oppover:

- $x_{instr} = x_{instr}$
- $y_{instr,rot} = -y_{instr}$
- $z_{instr,rot} = -z_{instr}$

Det betyr at stamp (pitch) endrer fortegn

- $pitch_{instr,rot} = -pitch_{instr}$

Gir (rotasjon om z-aksen) vil også endre fortegn, men dette er en variabel som ikke er rapportert.

Akselerasjonene er regnet om til AQWA som

- $\gamma = 112.74$
- $x_{AQWA} = \cos(\gamma) \cdot x_{instr} - \sin(\gamma) \cdot y_{instr,rot}$
- $y_{AQWA} = \sin(\gamma) \cdot x_{instr} + \cos(\gamma) \cdot y_{instr,rot}$
- $z_{AQWA} = z_{instr,rot}$



6 HYDRODYNAMISK MODELL (AQWA)

6.1 Introduksjon

Det er viktig å kvalitetssikre AQWA-modellen med tanke på geometrien og grensebetingelser. I denne modellen er grensebetingelsene for både strøm og bølger bestemt fra måledataene presentert i kapittel 2 og 4. For å sammenlikne med måledata må koordinatsystemer og posisjoner for målinger og måleutstyr samsvare med den numeriske modellen. Omgjøring av måledata til beregningenes koordinatsystem er beskrevet i kapittel 5.

6.2 Beregningsoppsett

Modellen tar utgangspunkt i arbeid som er gjort tidligere av Ranold AS [1]. I den rapporten er både RAO, decay tester og hydrodynamiske analyser testet mot reelle måledata fra Sintef. Vi brukte det samme modelloppsettet som i tidligere arbeid, men erstattet miljøforholdene for bølger og strøm med målte verdier.

Fra feltmålingene har vi valgt perioden 6. mars 2025, både over en firetimers periode og over en enkelttime som aktuelle sammenligningsdata. Perioden med største bølger er registrert i perioden kl. 07.00-07.17 UTC. Da ble det målt signifikant bølgehøyde på 0,834 meter. Den dynamiske simuleringen ble kjørt over en periode på 4000 sekunder. Dette tilsvarer en time med reell sjøtilstand siden systemet trenger en periode (estimert til maksimalt 400 sekunder) før bevegelsene stabiliserer seg.

Irregulær sjø er valgt for sjøtilstand der JONSWAP (joint north sea project) modellen er brukt. For å bruke JONSWAP må man legge inn (fra feltmålinger) signifikant bølgehøyde, «peak» frekvens og en gammaverdi. Både signifikant bølgehøyde og «peak» frekvens kan hente fra målte bølgedata. For timen som ble valgt til sammenligning var signifikant bølgehøyde 0,834 m og «peak period» 4,7 sekunder. Omgjort til «peak» frekvens blir dette 0,213 Hz. Gammaverdien beskriver hvor spredt eller hvor spisst frekvensspekteret er. Standarden eller gjennomsnittlig verdi er ofte gitt som 3,3, men verdien kan også tilpasses til sjøtilstanden for området [9]. Vi fant at en gamma verdi på 2,4 passet sjøtilstanden, men at verdien ikke påvirket resultatene nevneverdig. Se vurdering i Vedlegg C. Bølgeretningen er funnet fra feltmålinger, og koordinatene fra måledata er omgjort til den numeriske modellens koordinater. Gjennomsnittlig retning for bølgene ble funnet å være 7°, se kapittel 5.4 for detaljer. Retningen tilsvarer en vest-nordvestlig retning i virkeligheten.

Strømmen er inkludert i beregningene med retning og hastighet ved både 5 og 15 meters dyp. Det er noen klare retningsendringer i strømmen i de valgte periodene, se kapittel 5.5 for detaljer. Dette medfører noe usikkerhet.

Strømmen på 5 meters dyp har i perioden en retning på 291° i modellen, noe som tilsvarer nordlig retning. Gjennomsnittsverdien for farten er på 9,6 cm/s. På 15 meter dyp var det vanskeligere å finne et godt estimat for retningen, men vi valgte 170° med en gjennomsnittsfart på 12,2 cm/s.

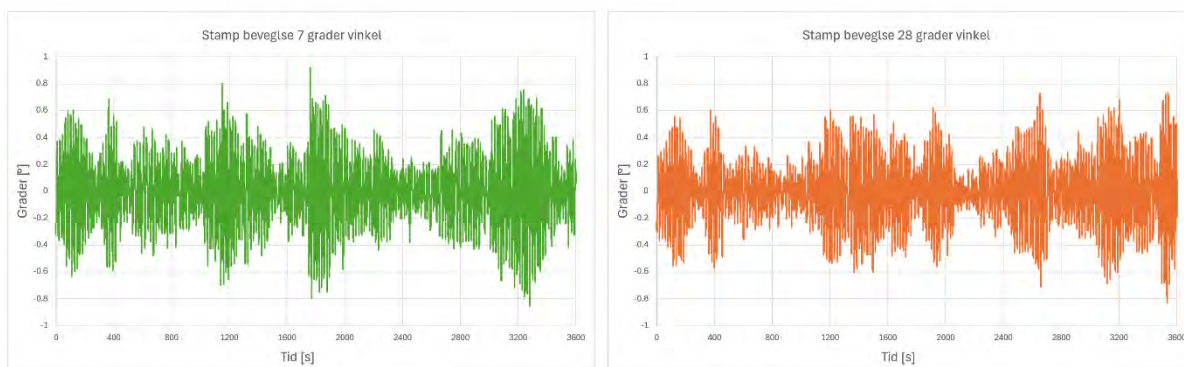
Tabell 3: Parametere for strøm satt i Ansys AQWA.

Dybde (m)	Fart (m/s)	Retning (°)
5	0,096	291
15	0,122	170

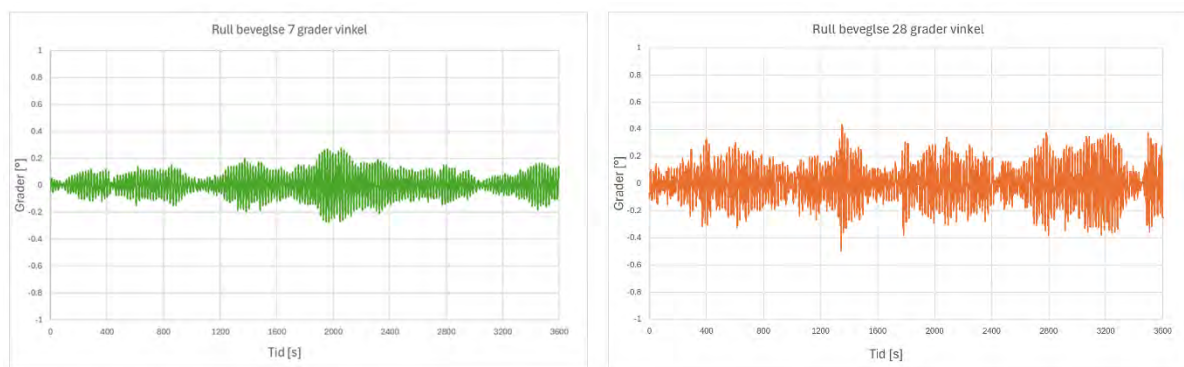
6.2.1 Bølgeretninger

Bølgeretning påvirker hvordan strukturen responderer på innkommende bølger. Fra feltmålingene ser vi en spredning i vinkel på innkommende bølger. Det er beregnet et standardavvik på 21° . Figur 29 viser bølgeretning 10° mot MD, midlet for en 4-timers periode. Ved retning på 7° (timesperioden) vil bølgene komme nesten parallelt med x-aksen. Det er da forventet at både jag- og stamp bevegelsene vil være større enn svai og rull. Hvis vi endrer vinkelen på bølgen med ett standardavvik, blir bølgeretningen 28° . Dette vil minke jag- og stamp bevegelsene, og øke svai- og rull bevegelsene.

Figur 36 og Figur 37 viser numeriske resultatet av både stamp- og rullbevegelsene for 7° og 28° bølgeretning. Vi ser at endringene som er beskrevet som forventet viser seg. Ved å la bølgene komme mer fra siden så minker stamp, mens rull øker.



Figur 36: Forskjellen i stamp bevegelse i forhold til bølgeretning.



Figur 37: Forskjellen i rull bevegelse i forhold til bølgeretning.

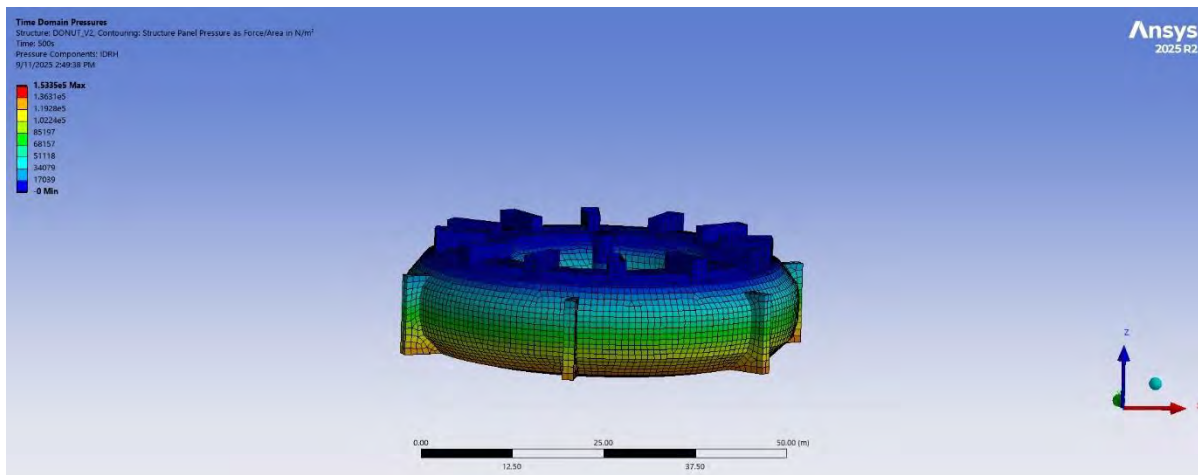
Måledataene viser at det er variasjon i bølgeretning. Det er derfor vurdert som hensiktsmessig å beregne påvirkningen på MD for forskjellige bølgeretninger mot konstruksjonen. Vi har valgt å beregne påvirkningen med gjennomsnittsvinkelen for alle bølgene, og variere vinkelen til pluss/minus et standardavvik som da blir 28° og -14° retning i modellen.

6.3 Trykkberegninger

Hvis beregnede trykkverdier og målt trykk samsvarer kan vi forvente at også andre strukture responser vil samsvare. I Ansys AQWA er det lokale trykket en sum av fire trykkkomponenter:

- **Hydrostatisk trykk:** Beregnet fra flytepunktet¹² i strukturen. Verdien forteller hvor dypt hvert punkt på strukturen ligger, ved å regne ut $\rho \cdot g \cdot h$, der ρ er tettheten til sjøvann, g er gravitasjonsakselerasjonen og h er høyden fra flytepunktet til målepunktet.
- **Froude-Krylov trykk:** Trykket (lokalt) som påføres strukturen ved at bølgene treffer konstruksjonen (beregnes uten konstruksjonens påvirkning på bølgene.)
- **Diffraksjonstrykk:** Modifisering av trykket fra innkommende bølger på grunn av bølgespredning rundt strukturen, og refleksjon av bølger fra strukturen. Disse bølgene vil interferere med innkommende bølger, og kan både dempe/kansellere og amplifisere de innkommende bølgene. For en storvolumstruktur (som er større eller sammenlignbar med bølgelengden) gir diffraksjonstrykket et vesentlig bidrag.
- **Radieringstrykk:** Trykket som kommer av at strukturens bevegelse genererer bølger. Hvis strukturens bevegelser er små, vil radieringstrykket være lite.

Figur 38 viser donut med trykk på ytterflaten etter 500 sekunder. Vi ser at trykket varierer over panelene eller elementene. Hvert element har en trykkverdi. Fra feltmålingene og informasjonen fra Sintef ble trykksensorens dybdeposisjon estimert, se Figur 4 for en skisse. For å få best mulig grunnlag for sammenligning mellom trykkmålingene og de hydrodynamiske analysene er det viktig å lokalisere det panelet som er nærmest posisjonen til trykksensoren.

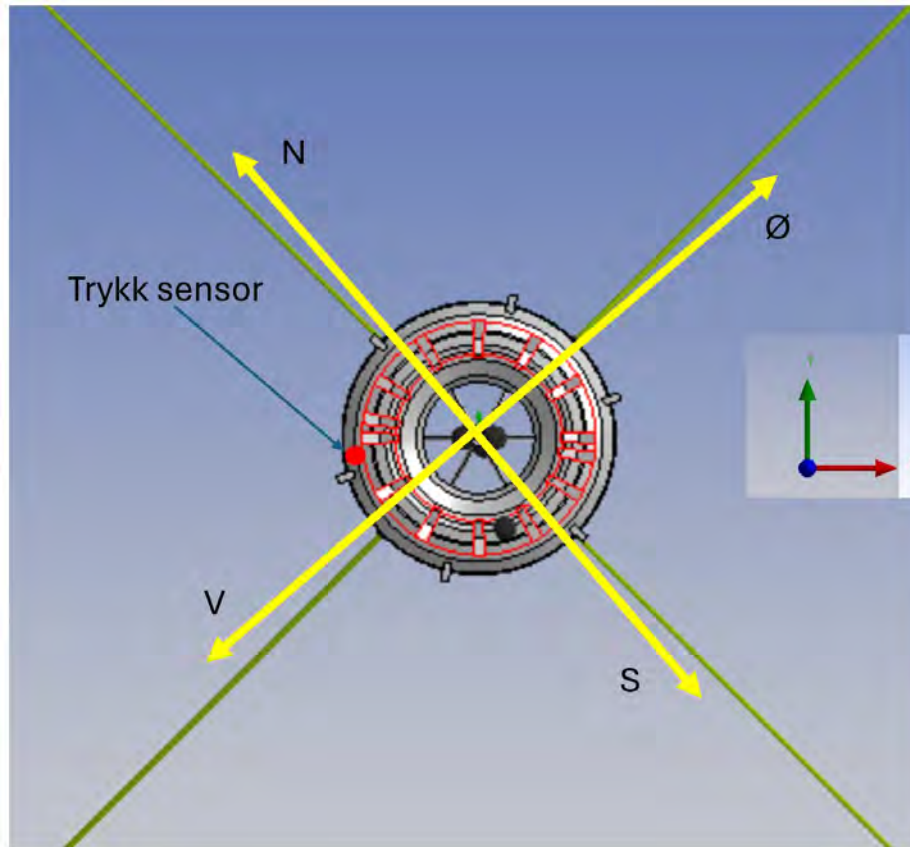


Figur 38: Trykkprofil for MD etter 500 sekunder simulering.

Ved å estimere posisjonen til trykksensoren og sammenlikne med posisjonen til de ulike panelene fant vi hvilket panel som var nærmest trykksensoren. Figur 39 viser lokaliseringen av trykksensoren i modellen.

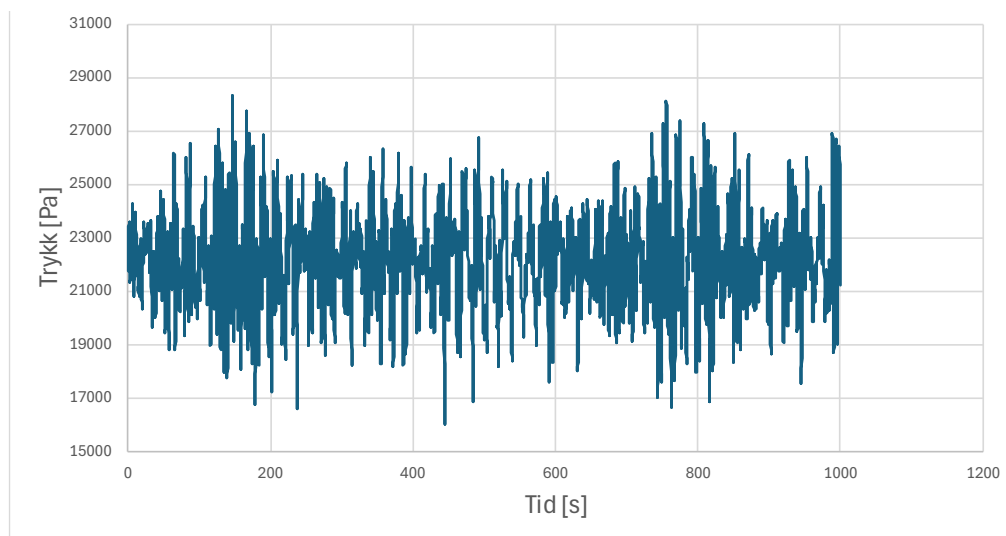
¹² Vannlinjenivået uten bølger.

Når panelets ID er kjent, kan vi ekstrahere transiente trykkdata for dette panelet. Trykket og variasjonen kan da sammenliknes med målt trykk med sin variasjon.



Figur 39: Lokalisering av trykksensor i AQWA.

Figur 40 viser dynamisk trykkdata for en periode på 1000 sekunder for elementet nærmest trykksensoren. Resultatene er fra beregningen med gjennomsnittlig bølgeretning.



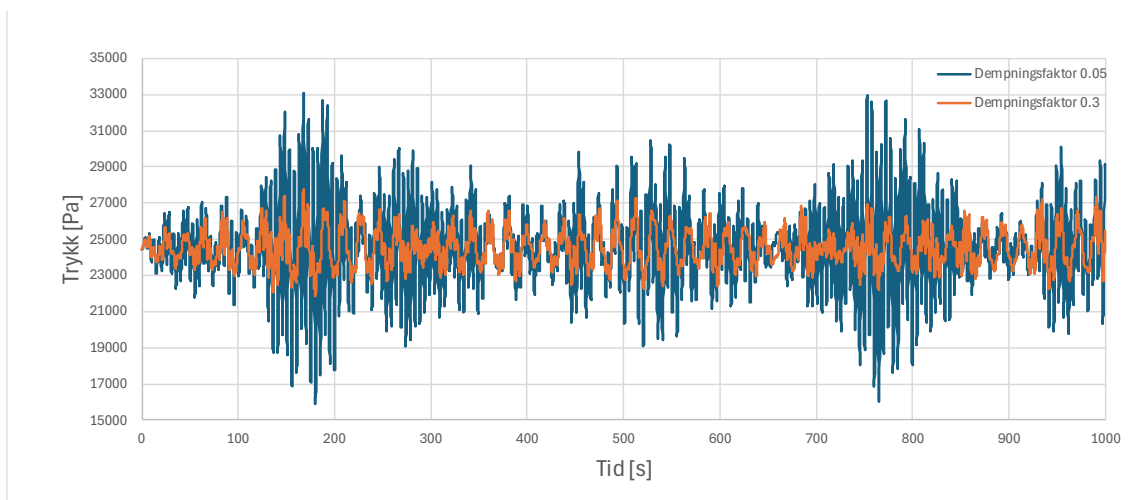
Figur 40: Beregnet dynamisk trykk for panelet nærmest trykksensoren i en periode på 1000 sekunder.

6.3.1 Innvendig trykk

Den interne tanken beregner det hydrostatiske og hydrodynamiske trykket basert på miljøforholdene på utsiden, som bølger, strøm og vind. Disse kreftene overføres til den interne strukturen for å evaluere belastningen på innsiden av tanken. I AQWA benyttes lineær potensialteori, som forutsetter at væsken er inkompressibel, irrotasjonell og uten viskøse effekter. Dette innebærer at kun trykkbidrag fra bølge- og strømhastigheter beregnes, mens viskøse krefter (som skyldes friksjon og turbulens) ikke inkluderes i modellen.

For å kompensere for manglende viskøse effekter introduseres en dempningsfunksjon (damping coefficient) i modellen. Denne fungerer som en empirisk korleksjon for energitap i systemet. Ifølge AQWA-teorimanualen anbefales det, i fravær av eksperimentelle data, å bruke en verdi mellom 0,05 til 0,1 for dempningsfaktoren. I det forrige modelloppsettet ble verdien satt til 0,05.

Under «decay»-tester av stampbevegelsen i et tidligere prosjekt ble det observert større svingninger enn forventet, noe som indikerte at den opprinnelige dempningsfaktoren var for lav. Etter justering til 0,2 ble det oppnådd bedre samsvar mellom beregnet innvendig trykk og måldata. Denne justeringen reduserte amplituden i bevegelsen og ga en mer realistisk respons i henhold til hydrodynamiske prinsipper. Figur 40 viser endringen i trykkforholdet innvendig i Marine Donut som følge av økt demping.



Figur 41: Beregnet dynamisk trykk for panelet nærmest innvendig trykksensoren i en periode på 1000 sekunder.

AQWA er i hovedsak utviklet for å analysere skip og andre maritime konstruksjoner med tradisjonelle skrogformer. Lukkede oppdrettsanlegg har derimot en helt annen utforming og formål, noe som gir et avvikende strømningsbilde inne i den interne tanken. Dette kan føre til større utslag i interne trykk og bevegelsesrespons enn det som normalt oppstår på et skip.

6.4 Akselerasjons- og rotasjonsberegninger

En flytende konstruksjon på havet har seks frihetsgrader eller 6-DOF (degrees of freedom). Det er bevegelse i de 3 koordinatretningene:

- Jag i x-retning
- Svai i y-retning
- Hiv i z-retning

Det er også rotasjon om de 3 aksene:

- Rull om x-aksen
- Stamp om y-aksen
- Gir om z-aksen

I AQWAs teorimanual er den dynamiske strukturresponsen fra miljøpåvirkninger som bølger og strøm gitt ved følgende likning.

$$F_t = M\ddot{U} \quad \text{Equation 6-1}$$

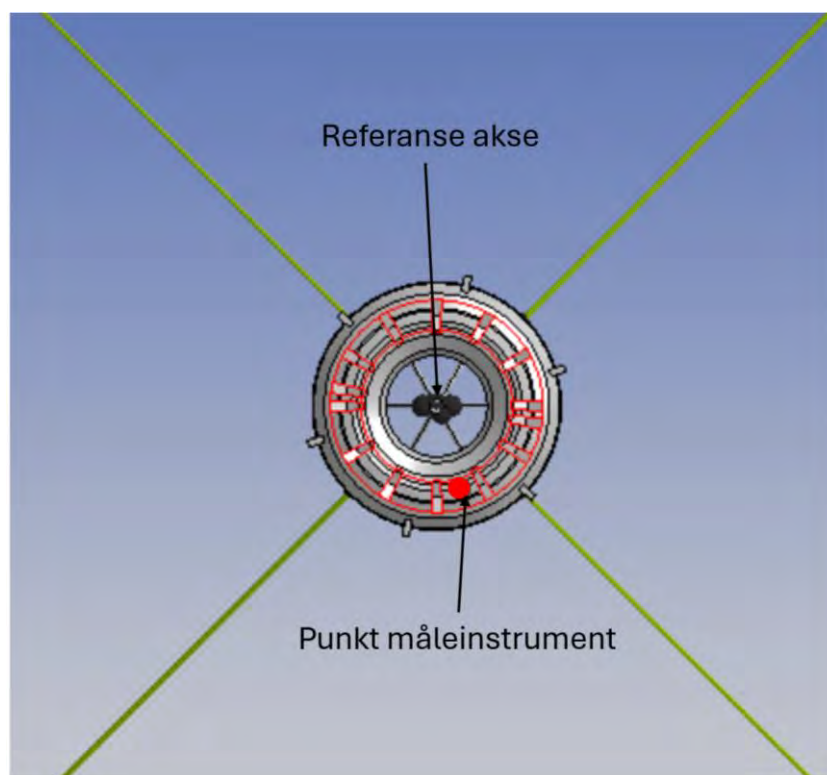
der F_t er eksterne krefter, M er massematrisen for både strukturen og den pålagte hydrodynamiske massen, $\ddot{U}$ tilsvarer akselerasjon. Ved å neglisjere høyere ordens uttrykk og linearisere bevegelsen kan bevegelsen til strukturen beskrives ved følgende likning.

$$F = M_t\ddot{U} + C\dot{U} + KU \quad \text{Equation 6-2}$$

Den utvidede likningen tar nå hensyn til både dempingsmatrisen gitt som C og stivhetsmatrisen gitt som K . I en tidligere rapport fra Ranold [1] har vi ved å sammenlikne RAO, decay tester og krengeprøver utført av Sintef Ocean på en modell av MD, funnet strukturens stivhetsmatrise og dempingsmatrisen. Dempningsmatrisen som settes manuelt skal hensynta forhold som ikke

løses i AQWA. Dette inkluderer blant annet friksjonskrefter fra vann etc. Stivhetsmatrisen bestemmes hovedsakelig av to elementer i dette systemet: fortøyning av strukturen og hydrostatikken til strukturen. Fortøyningen er dominerende for bevegelsene jag, svai og gir. Hydrostatikken er dominerende for bevegelsene hiv, rull og stamp. Det interne vannvolumet og dets bevegelse inne i donuten vil også bidra til rull og stamp bevegelser.

For å kunne sammenlikne beregnet akselerasjon i AQWA med målte verdier må lokasjonen til måleinstrumentet settes i AQWA. Denne lokasjonen ble bestemt som beskrevet i kapittel 5.3. Vanligvis regnes bevegelse fra referanseaksen i AQWA. Denne er satt i midten av donuten. Når instrumentets lokalisering er bestemt, kan AQWA beregne akselerasjonen i punktet der instrumentet er lokalisert basert på referanseaksen. Figur 42 viser posisjonen der vi har blitt informert om at IMU er lokalisert.



Figur 42: Lokalisering av IMU måleinstrument.

Rotasjonsbevegelsene rull og stamp er uavhengige av målepunktet. For rotasjon er bevegelsene like store som i referanseaksen siden rotasjon er oppgitt som vinkler.

7 SAMSVARSVURDERING NUMERISK MODELL OG MÅLEDATA

7.1 Introduksjon

Hensikten med å sammenligne beregnede og målte verdier for trykk og bevegelse er å vurdere påliteligheten til analyseresultatene. Det vil alltid være usikkerheter i både modellerte og målte verdier. Flere av disse er belyst i foregående kapitler. Det er gjort en sammenlikning av AQWA-beregninger og målte verdier av trykk, rotasjon og akselerasjon.

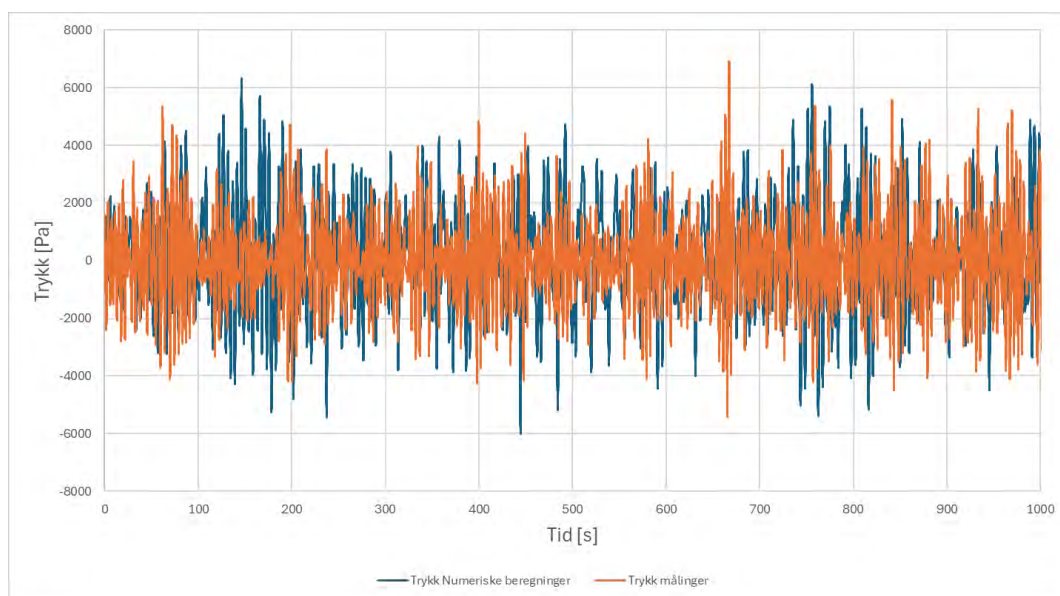
Vi har valgt en enkelt time der målte bølger var store, 6. mars 2025 kl. 07.00 UTC, for sammenlikning med beregningene.

7.2 Sammenlikning av trykk

Det er forskjeller i hvordan programmet beregner det hydrostatiske trykket sammenliknet med trykksensorene. Det hydrostatiske trykket er derfor subtrahert fra både de beregnede og de målte trykkene.

I AQWA er det hydrostatiske trykket bestemt fra høyden fra vannoverflaten ned til elementet. For trykksensoren ser det ut som sensoren har blitt kalibrert til å vise null trykk ved måledybden. Etter flere hevinger og senkninger av strukturen har ikke sensoren kommet tilbake til det originale nullpunktet. Trykksensoren måler absolutt trykk, og viste negativt trykk i måleseriene. Gjennomsnittsverdien av trykket er et mål på summen av hydrostatisk trykk og lufttrykk, og har blitt trukket fra for å kunne sammenlikne. Trykkene som sammenliknes vil derfor variere rundt 0 Pa.

Figur 43 viser beregnet trykk med blått og målt trykk med oransje for en periode på 1000 sekunder.



Figur 43: Sammenlikning mellom målt og beregnet trykk.

Det er god overenstemmelse mellom beregningene og feltmålingene. Trykkvariasjonene har samme størrelsesorden. Den numeriske modellen bruker en empirisk modell for å bestemme bølgeperioden og bølgehøyden når parameterne i JONSWAP-modellen er satt. Bølgene som måles er tilfeldige innenfor et sannsynlighetsdomene. Det kan derfor ikke forventes et eksakt samsvar.

Trykktoppene kommer fra bølgetopper mens de lave trykkverdiene kommer fra bølgedalene.

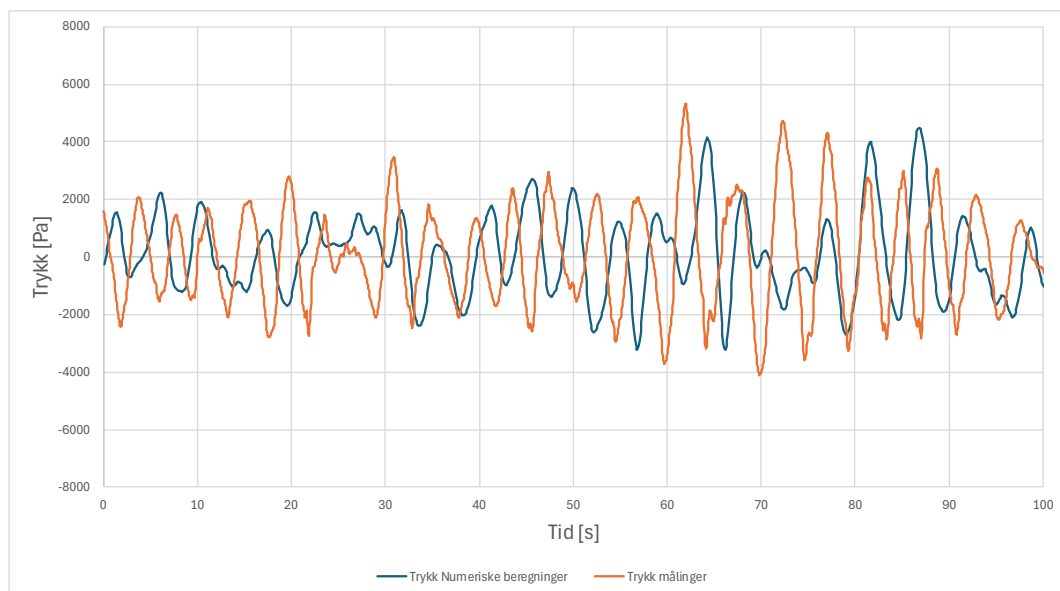
Variasjonene er hyppige, og derfor ikke mulig å studere i detalj i Figur 43. Ved å fokusere på en kortere periode på 100 sekunder i Figur 44, kan man se at bølgetoppene kommer med høyere frekvens i måledataene enn beregningene, estimert til 1-2 flere bølgetopper per minutt i målingene enn i beregningene. Dette kan skyldes at frekvensspekteret satt i JONSWAP avviker noe fra måledataene. Forskjellen er liten, og innenfor akseptabel usikkerhet.

Bølgemålingene er gjort nordøst for MD, se Figur 6 for plassering av målebøyen. Forskjellen i lokasjon kan også påvirke resultatene i noen grad som beskrevet i kapittel 4.4.

De målte trykkene i perioden varierer, som vist i Figur 12, mellom -1300 og 0 mm H₂O. Målingene er sentrert rundt en gjennomsnittsverdi på ca. -600 mm H₂O. Dette tilsvarer en forskjell mellom bølgedal og bølgetopp på 1,3 meter. I Figur 44, ved tid 60 sekunder, ser vi et utslag fra -4000 Pa til 5500 Pa, som tilsvarer en bølgehøyde på bortimot 1 meter. I Tabell 1 viser målingene at den største målte bølgehøyden i perioden var på 1,328 m. Den verdien stemmer godt overens med trykkvariasjonene som viser en variasjon i vannsøylen over måleren på opp til 1,3 meter.

Ved å sammenligne de målte og beregnede trykkvariasjonene (Figur 43 og Figur 44) ser vi at amplitudene er sammenlignbare. Vi konkluderer dermed med at beregningene gir realistiske verdier for bølgene som treffer donuten.

Siden både beregnet frekvens og beregnet amplitude samsvarer godt med de målte verdiene for trykk, konkluderer vi med at beregningene gir realistiske verdier for trykk.

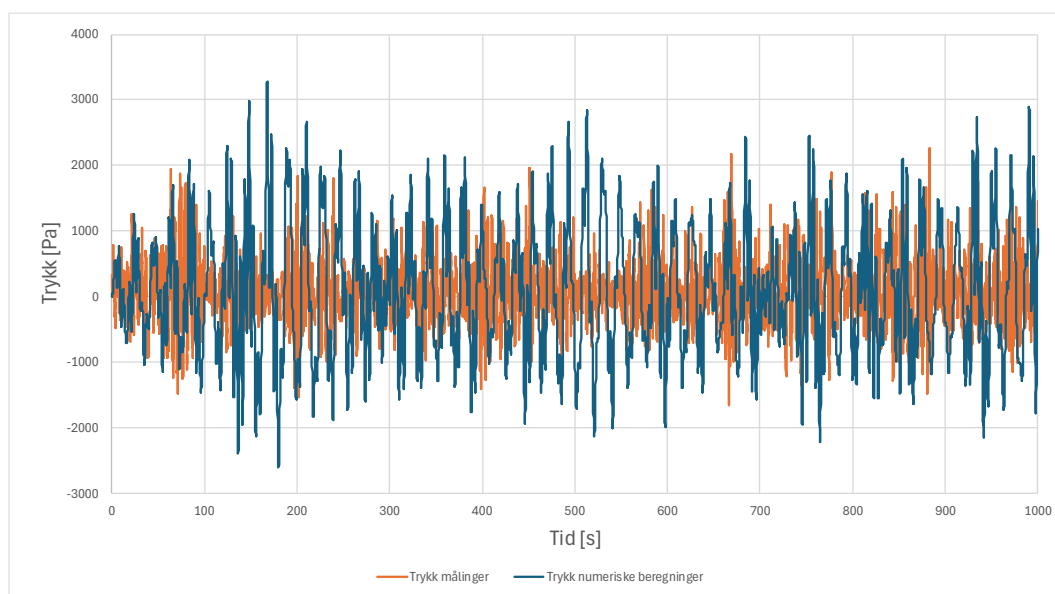


Figur 44: Trykkdata for 100 sekunder, beregnede og målte verdier.

7.2.1 Innvendig trykk

For å sammenligne det innvendige trykket er det hydrostatiske trykket trukket fra, slik at man får en direkte sammenligning mellom målte og beregnede trykkverdier. På innsiden av donuten er det installert trykksensorer som måler absolutt trykk, helt lik sensortypen brukt i målinger for utvendig trykk.

Trykksvingningene inne i tanken er et resultat av kombinasjonen av marine donut sine bevegelser og miljølastene som virker på systemet, som bølger og strøm. Disse dynamiske lastene skaper interne sloshing-fenomener, som i hovedsak bidrar til bevegelse i rull og stamp. Siden AQWA beregner sloshing basert på lineær potensialteori uten viskøse krefter, må en dempningsfaktor legges til (jf. kapittel 6.3.1) for å kompensere for energitap. Denne faktoren kan justeres iterativt for å oppnå best mulig samsvar med målte data.

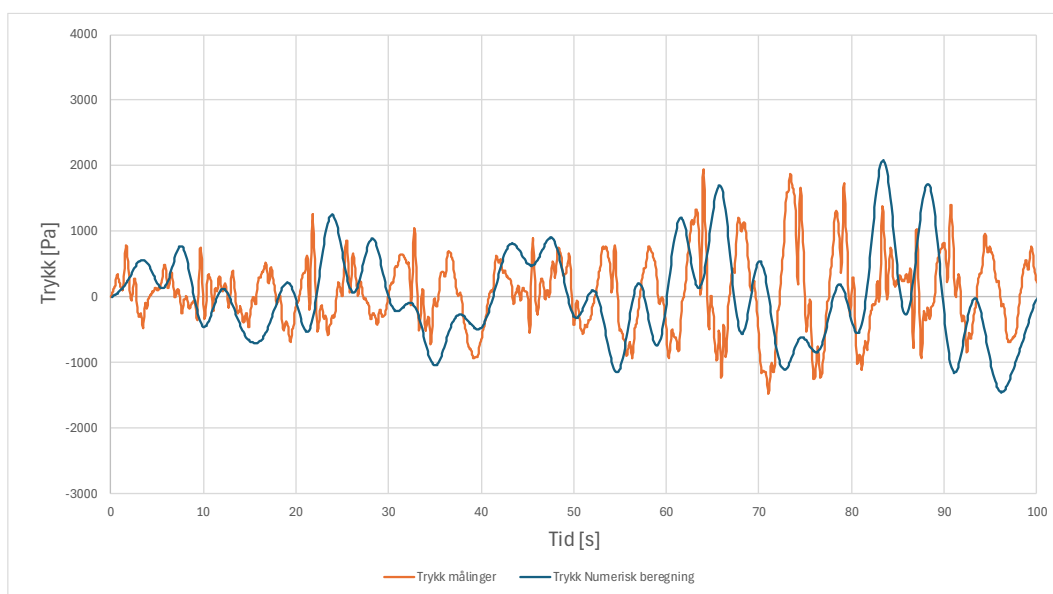


Figur 45: Sammenlikning mellom målt og beregnet trykk for innvendig tank.

Figur 45 viser at de numeriske beregningene gir noe høyere trykksvingninger enn de målte dataene. Dette indikerer at sloshing-effektene inne i donuten blir overpredikert sammenlignet med den faktiske tilstanden. En slik overprediksjon er imidlertid konservativ, ettersom den gir en sikkerhetsmargin ved å anta større interne bevegelser enn det som reelt oppstår.

Ved å øke dempningsfaktoren reduseres sloshing-effektene, og dermed trykkvariasjonene. En moderat overprediksjon av trykket er ønskelig fra et designperspektiv, fordi det gir en robust dimensjonering mot dynamiske belastninger. Økningen av dempningsfaktoren fra 0,05 til 0,2 gir mindre enn 10 % reduksjon i bevegelsesresponsen, noe som viser at påvirkningen på global bevegelse er minimal. Trenden er tydelig: høyere dempning gir lavere interne trykk og mindre bevegelse i donuten enn først antatt. Stamp- og rullebevegelser, som med en dempningsfaktor på 0,05 var noe overpredikert, samsvarer bedre med måldata når sloshing-effektene reduseres.

Figur 46 viser frekvensspekteret inne i tanken, som reflekterer sloshing-responsen. Denne frekvensen er i hovedsak lik den som oppstår fra de ytre bølgepåvirkningene, ettersom bølgene initierer den interne responsen. Dermed oppstår et korrelert frekvensspekter mellom innvendig trykk og utvendige bølgeforhold.

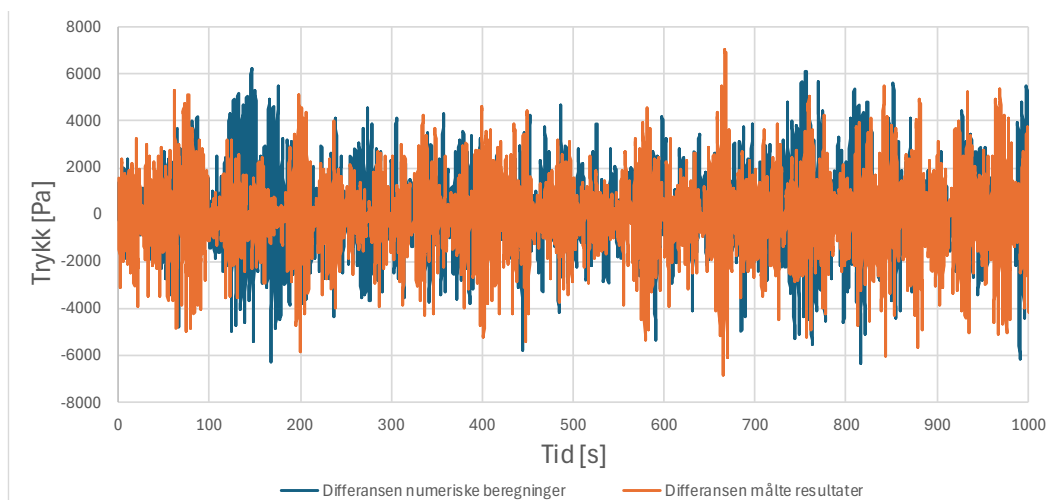


Figur 46: Trykkdata for 100 sekunder, beregnede og målte verdier.

7.2.2 Trykk differansen

Basert på måledata og beregninger fremgår det at det utvendige trykket er høyere enn det indre trykket. Denne forskjellen er i tråd med tidligere observasjoner. Det utvendige trykket påvirkes direkte av bølger, strøm og vind, mens det indre trykket i Marine Donut i større grad er dempet av konstruksjonens geometri og interne vannvolum.

Figur 47 viser trykkdifferansen mellom utsiden og innsiden av konstruksjonen. Det er antatt at begge trykksensorene er plassert på samme vertikale nivå, slik at hydrostatisk trykkforskjell kan neglisjeres. Analysen av trykkdifferansen viser at svingningene følger lignende trend som det utvendige trykket, noe som indikerer at ytre bølgepåvirkning dominerer dynamikken. Dette er forventet, da trykkvariasjoner fra bølger har høyere amplitude og raskere respons enn interne strømninger.



Figur 47: Sammenlikning mellom målt og beregnet trykk differanse for innvendig tank.

7.3 Sammenlikning bevegelser 6-DOF (frihetsgrader)

7.3.1 Introduksjon

Måldata fra akselerometeret og krengningsmåleren er sammenliknet med de numeriske resultatene. Måldataene har rapportert akselerasjonene jag, svai og hiv, og rotasjonene rull og stamp. Giring har ikke blitt rapportert. Et godt samsvar mellom beregnede og målte verdier vi si at utslagene er omtrent like store. Et godt samsvar vil bety at en beregning for andre miljøforhold, f.eks. større bølger eller kraftigere strøm, kan forventes å gi resultater som tilsvarer det som ville blitt målt under tilsvarende forhold.

Den målte akselerasjonen i hiv-retning er veldig liten, omtrent 2 mm/s^2 , som beskrevet i kapittel 4.3 og vist i Figur 21. Hivmålingene er gjort ved en posisjon langt fra strukturens tyngdepunkt. Det er usikkert hvordan det påvirker resultatene. Avhengig av bevegelsene kan dette både resultere i økt eller redusert hiv. Resultatene for hiv har derfor ikke blitt inkludert i sammenlikningen.

7.3.2 Sammenlikning akselerasjon

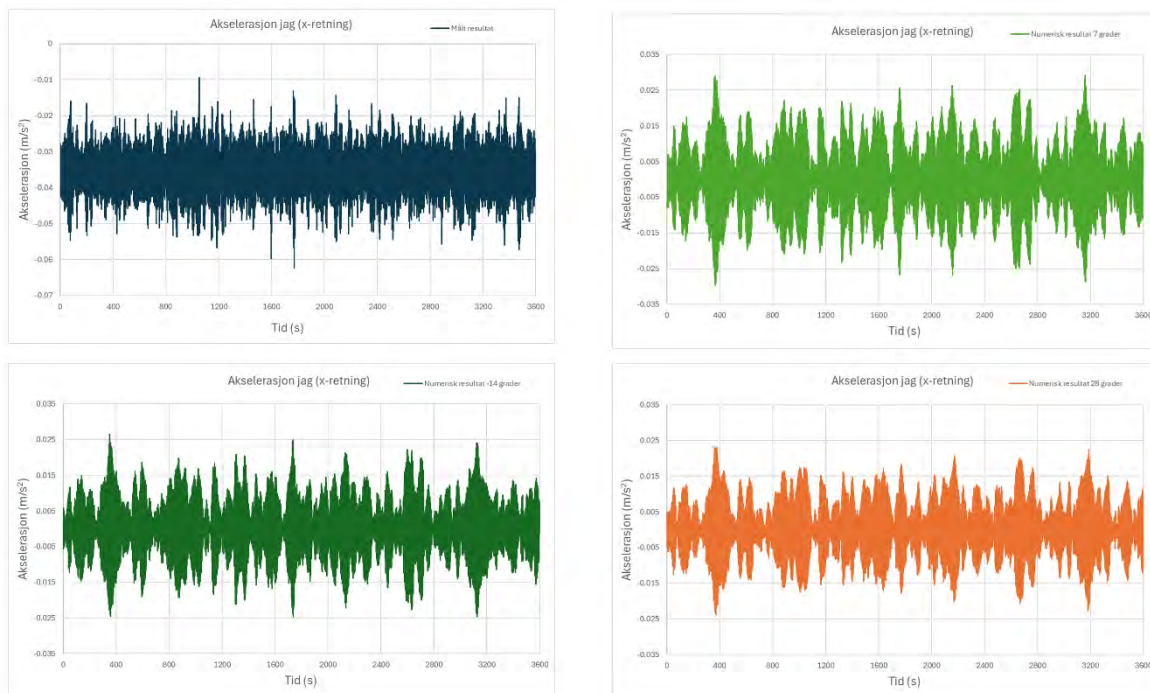
Akselerasjon er et mål på hvor raskt farten endrer seg. Akselerasjonen i z-retning er dominert av gravitasjonen, men den forårsaker ikke direkte en bevegelse av strukturen. Akselerasjonen i de to horisontale retningene forteller hvor raskt farten/bevegelsen endrer seg. Både målinger og beregninger viser svingning rundt et nullpunkt som passer med at donut svinger om et fast senterpunkt.

Figur 48 viser akselerasjonsdata for jag (x-retning) for tre bølgeretninger i Ansys AQWA og den målte akselerasjonen. Jag-bevegelsen er nesten parallell med bølgeretningen.

Utslaget (y-aksen) er like stor ($0,07 \text{ m/s}^2$) i alle figurene. Øverst til venstre vises målingene. Øverst til høyre vises beregningsresultatene for bølgeretning 7° (gjennomsnittsverdien). Nederst vises beregningsresultatene for bølgeretningene -14° og 28° (± 1 standardavvik (21°)).

Beregningene viser god overenstemmelse med målingene. Målingene ser ut til å ha kjappere respons enn de numeriske beregningene. Dette kan skyldes at instrumentet registrerer data hvert 0,05 sekund (20 Hz), mens beregninger bruker tidssteg på 0,1 sekunder.

Amplituden av svingningene er relativt lik. Både målingene og beregningene svinger fra 0,025 til -0,025 m/s² fra senterlinja. Siden modellen er orientert slik at bølgene kommer nesten parallelt med x-retningen er det naturlig at det er størst bevegelse i jag-retningen. Bølgeretning 7° er mest parallell med x-retningen, etterfulgt av -14° og 28°. Vi ser at amplituden av beregningsresultatene er størst for 7°, og avtar mot minst utslag for 28°.



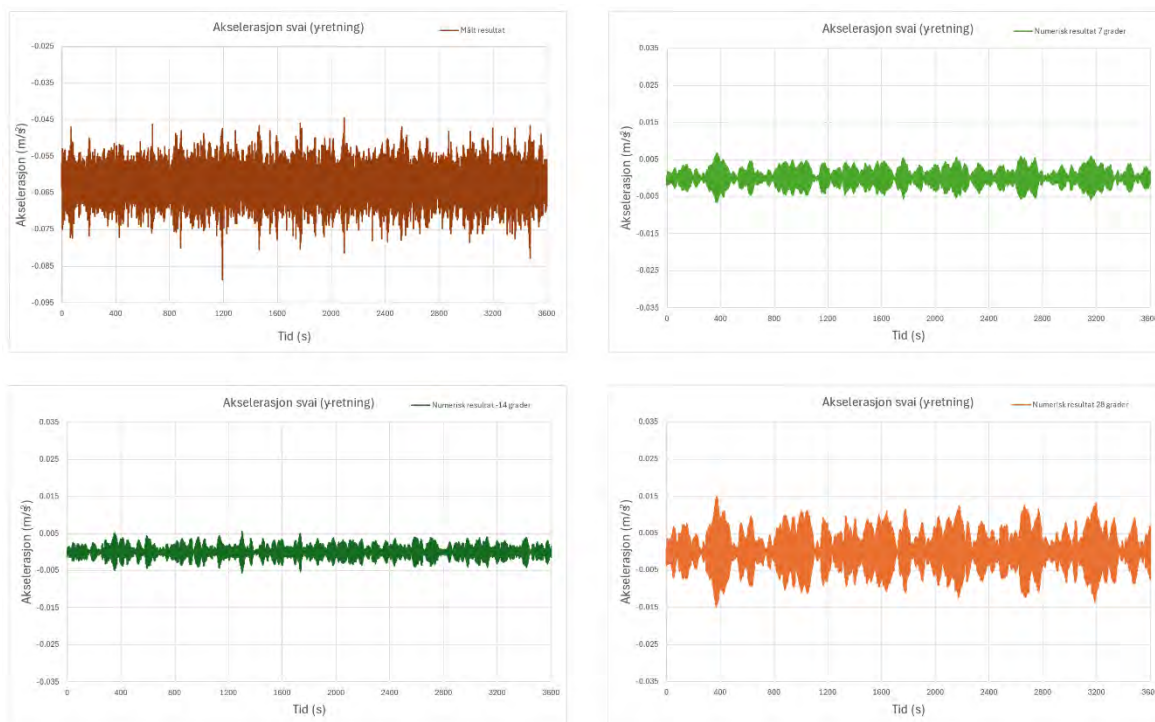
Figur 48: Målte og beregnete verdier for jag. Øverst, venstre: Målinger. Øverst, høyre: Beregninger 7° bølgeretning. Nederst, venstre: Beregninger -14° bølgeretning. Nederst, høyre: Beregninger 28° bølgeretning. Y-aksen har utstrekning på 0,07 m/s² i alle figurene.

Resultatene for svai viser mer variasjon i svingningene mellom bølgeretningene. Figur 49 viser resultatene for svai. Utslaget (y-aksen) er like stor (0,07 m/s²) i alle figurene. De målte verdiene (amplituden) for jag og svai er sammenlignbare, med jag litt større. Standardavviket for målingene i jag var 0,0047, mens standardavviket for målingene i svai var 0,0038. Beregningene viser mindre utslag i svai enn i jag når bølgene kommer nær x-retning, og en tydelig økning i svai når bølgene kommer med vinkel 28°.

Beregningene for bølgeretningene 7° og -14° viser mindre svai-bevegelse enn de målte verdiene. Amplituden i svai for 7° bølgeretning er litt større enn for -14° grader. Det avviker fra forventningen siden bølgene kommer mer i svai-retning for -14°. Forskjellene i verdi og vinkel er små. Amplitudene er også små.

Beregningene for 28° bølgeretning har amplituder som samsvarer godt med målingene. Forskjellene mellom målinger og beregninger kan skyldes at bølgene som treffer donuten har en litt annen retning enn de som er målt. I Vedlegg A har vi lagt med informasjon om at vindretningen var fra litt sør for rett vest. Bølgemålingene viste at bølgene kom fra nordvest. Dette kan skyldes at bølgene avbøyes rundt nordkysten av øya Sekken slik Åkerblå har vist i sin lokalitetsrapport [3], og som vi har gjengitt i kapittel 4.4 om usikkerheter. Det er dermed mulig at bølgeretningen

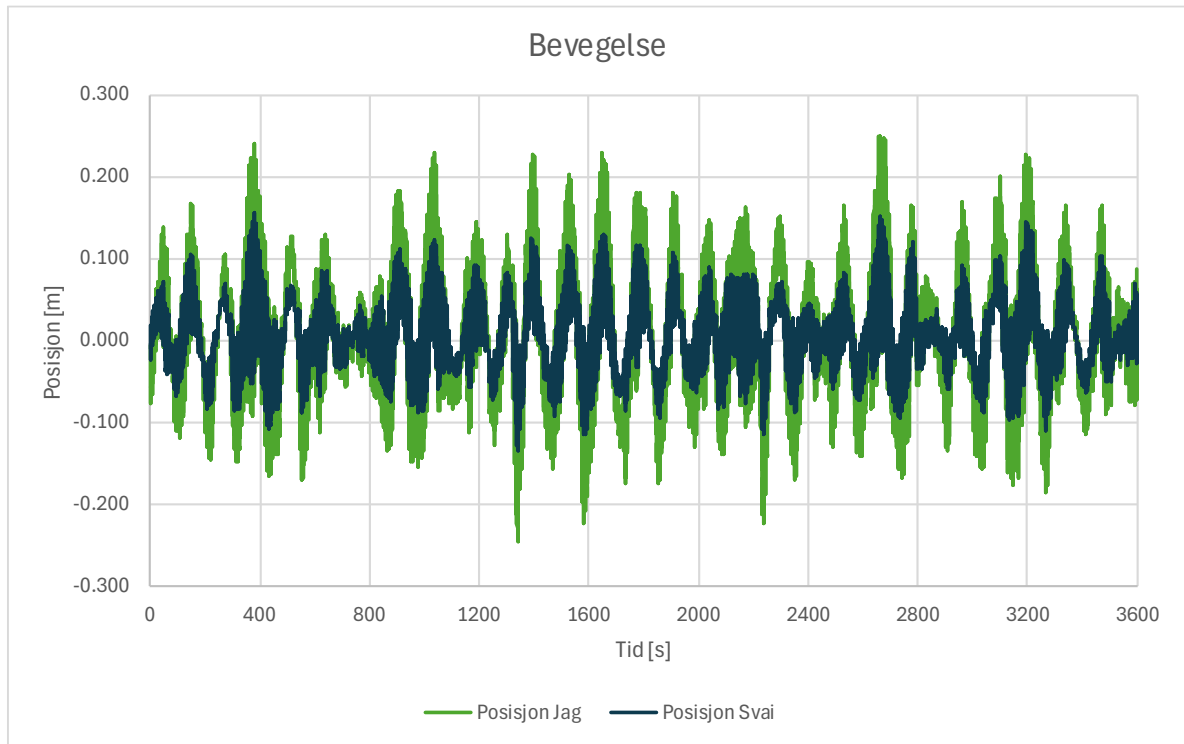
ved bøya og anlegget avviker noe. Det er små forskjeller som også kan skyldes ulik beskrivelse/oppsett av fortøyningene i modellen og i virkeligheter. Modellen ble kalibrert mot modellforsøkene hos Sintef Ocean som beskrevet i tidligere rapport [1].



Figur 49: Målte og beregnede verdier for svai. Øverst, venstre: Målinger. Øverst, høyre: Beregninger 7° bølgeretning. Nederst, venstre: Beregninger -14° bølgeretning. Nederst, høyre: Beregninger 28° bølgeretning. Y-aksen har utstrekning på 0,07 m/s² i alle figurene.

7.3.3 Bevegelse i horisontalplanet

Bølgepåvirkningen fører til at donuten beveger seg i horisontalplanet. Figur 50 viser bevegelsen i jag og svai retningene for beregningene gjort for 28° bølgeretning. De viser at donut beveger seg maksimalt 0,25 meter fra senterposisjonen. Vi ser også at jag og svai har utslag i samme retning. Det skyldes at bølgene beveger seg mot positiv x og positiv y. Donut beveger seg fram og tilbake avhengig av bølgeretningen, strømmen og fortøyningene.



Figur 50: Bevegelsene i jag og svai retningene for bølgeretning 28°.

7.3.4 Sammenlikning rotasjonsbevegelse

Rotasjonsbevegelsene stamp og rull korrelerer direkte til strukturens hydrostatikk og det interne vannets bevegelser i MD. For MD er det ikke egentlig noen forskjell på stamp og rull. Donut er en torus, og har lik utstrekning i begge de horisontale retningene (x og y).

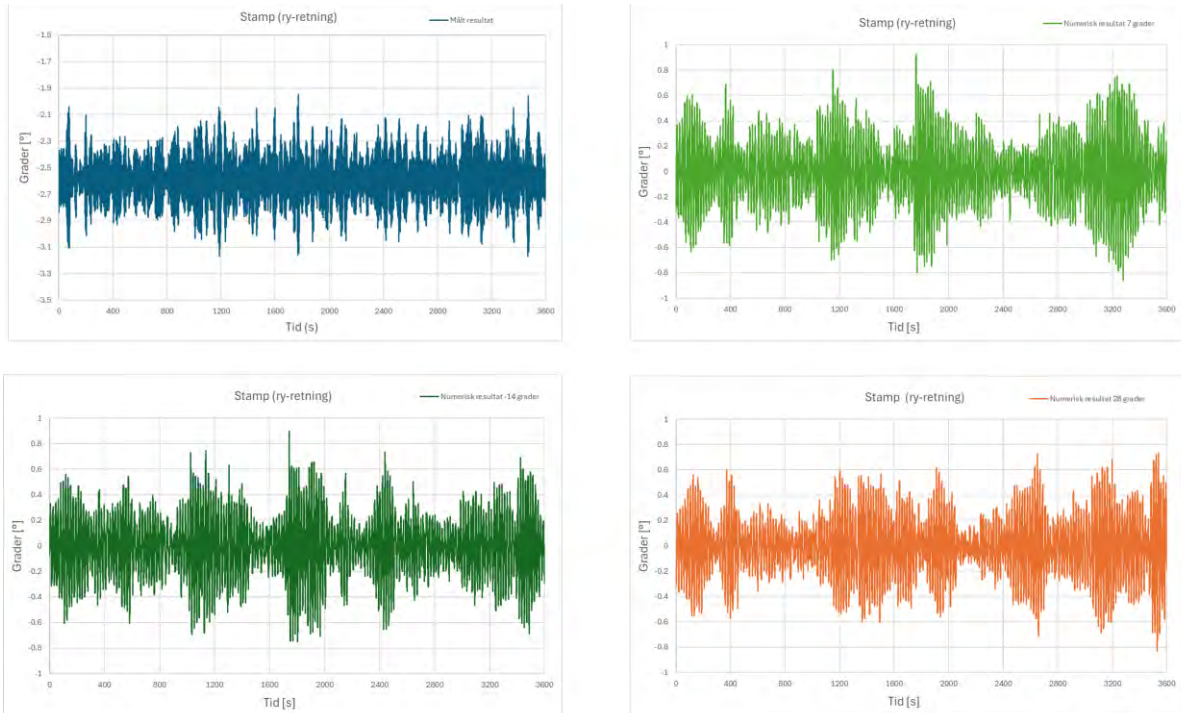
Figur 51 viser målte og beregnede verdier for stamp. Det er godt samsvar mellom målingene og beregningene. Beregnet stamp er litt større enn de målte verdiene, men utslagene har omtrent samme størrelsesorden. Generelt er rotasjonsbevegelsene små.

Det største utslaget fra middelveiden er omtrent 0,64°.

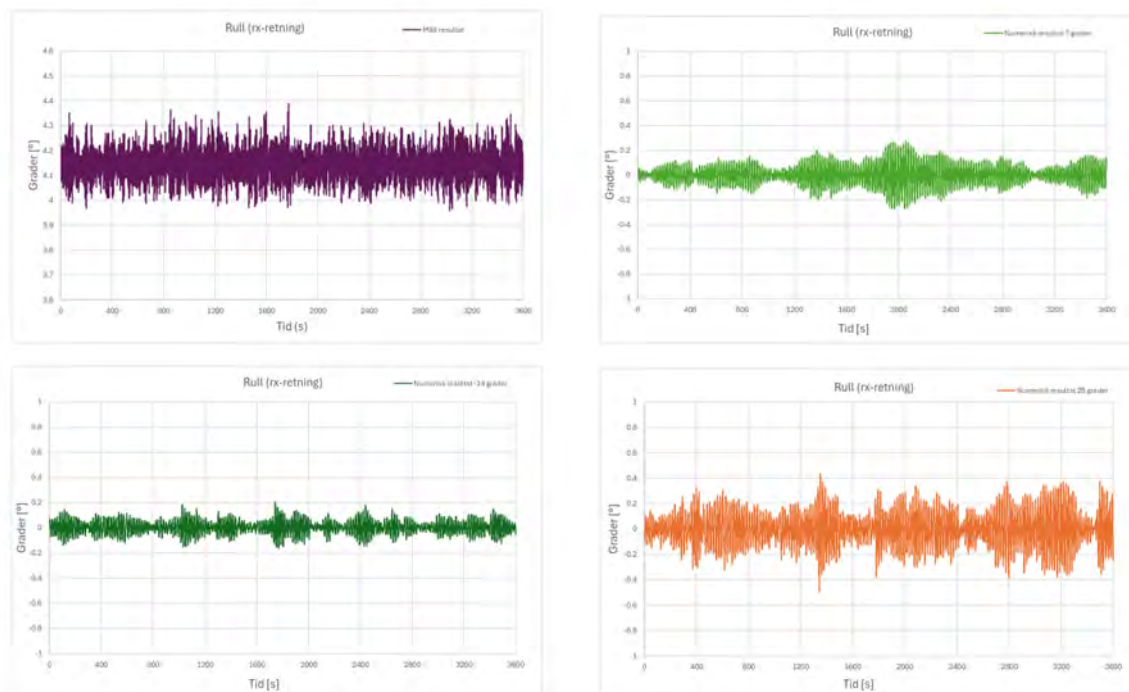
Figur 52 viser målt og beregnet rullebevegelse for MD. Vi ser tilsvarende overenstemmelse med målte verdier som for svai. Det er en uventet forskjell mellom -14° og 7° slik det også var for akselerasjonen. De målte verdiene varierer rundt 4,1°, sannsynligvis fordi instrumentet har stått skjevt i forhold til donut. Tilsvarende som for svai er det bølgeretning 28° som viser best samsvar med målingene.

Det største utslaget fra middelveiden er omtrent 0,25°.

Både stamp og rull viser god overensstemmelse med måledata. Det indikerer at den numeriske modellen predikerer bevegelsene på en akseptabel måte.



Figur 51: Målte og beregnede verdier for stamp. Øverst, venstre: Målinger. Øverst, høyre: Beregninger 7° bølgeretning. Nederst, venstre: Beregninger -14° bølgeretning. Nederst, høyre: Beregninger 28° bølgeretning.



Figur 52: Målte og beregnede verdier for rull. Øverst, venstre: Målinger. Øverst, høyre: Beregninger 7° bølgeretning. Nederst, venstre: Beregninger -14° bølgeretning. Nederst, høyre: Beregninger 28° bølgeretning.



8 OPPSUMMERING OG KONKLUSJON

Vi har beregnet påvirkningen på donut fra bølger og strøm som ble målt i en periode med store bølger med programvaren AQWA fra Ansys. Resultatene fra beregningene beskrev trykket/kreftene som donut ble påført, og donutens respons på disse kreftene. Donutens bevegelse i de 6 frihetsgradene ble beregnet. Donutens påvirkning på bølgefeltet blir også beregnet, men har ikke blitt rapportert her.

Vi har sammenlignet målt og beregnet trykkpåvirkning på strukturen i et målepunkt. Vi har også sammenlignet strukturens målte og beregnede respons på påvirkningene, altså hvordan strukturen beveget seg som følge av strøm og bølger.

Vi fant godt samsvar mellom frekvens og amplitude for trykket. Amplituden samsvarer også godt med målte bølgehøyder.

Vi fant godt samsvar mellom målt og beregnet strukturrespons, altså bevegelse. Beregnet akselerasjon i de horisontale retningene (jag og svai) samsvarte godt med målingene. Beregnet rotasjonsbevegelse (målt i ° (grader)) rundt de horisontale aksene (stamp og rull) samsvarte godt med målingene.

Vi kan derfor konkludere med at beregningene gjort med AQWA samsvarer godt med måldata. Vi konkluderer videre med at AQWA er et egnet program for å beregne krefter på donut fra bølger og strøm, og donutens respons og bevegelser.



9 REFERANSER

- [1] Hydrodynamisk analyse – Marine Donut, Ranold rapport no. 2023-1534-03.
- [2] Berget, Kjetil; Feltnmålinger Donut, Sintef rapport no. 302008368 for Salmar Farming AS, 2025.
- [3] Lokalitetsrapport etter NS 9415:2009, Seterneset, Åkerblå for SalMar Farming, rapport no. LR-T-03519-Seterneset1019-ver02.
- [4] Kommunikasjon med Geir Haugen, ABB.
- [5] Kommunikasjon med Øystein Breiteig, Åkerblå.
- [6] Kommunikasjon med Steingrim Holm, SalMar AS.
- [7] Kommunikasjon med Geir Andresen, Bluegreen Fusion AS.
- [8] Kommunikasjon med Kjetil Berget, Sintef.
- [9] Torsethaugen, Knut, and Sverre Haver. "Simplified double peak spectral model for ocean waves.", ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference. ISOPE, 2004.
- [10] Berget, Kjetil; Feltnmålinger Donut, Oversikt statistikk.xlsx, 2025.
- [11] Sælen, Odd Henrik; Weber, Jan Erik; Barthel, Knut: *Havbølger* i *Store norske leksikon* på snl.no. Hentet 23. september 2025 fra <https://snl.no/havbølger>

10 VEDLEGGSLISTE

Vedlegg A Værbetingelser
Vedlegg B Tidsmidlete data (4 timer)
Vedlegg C Variasjon av gammaverdi



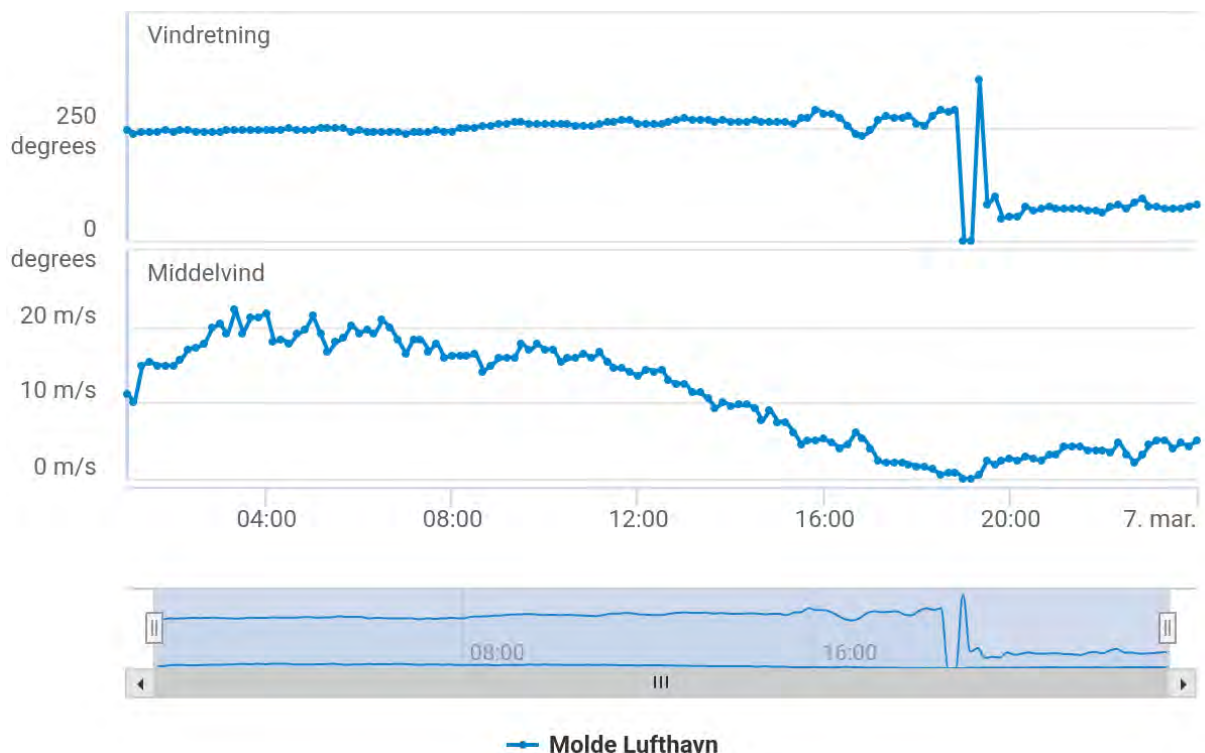
Vedlegg A Værbetingelser



Vindforholdene er styrende for bølgedannelsen. Bølgene er sentrale for hydrodynamiske analyser.

Perioden der målingene viser store signifikante bølgehøyder er godt egnet for hydrodynamisk analyse. Figur 53 viser vindmålinger for 6. mars 2025 for Molde lufthavn som ligger 8,5 km fra Seterneset. Det var jevn vind fra 250° (20° sør for vest) fra midnatt til kl. 18.50. Vinden økte i styrke fra midnatt til kl. 03.00, og avtok fra kl. 07.00. Gjennomsnittlig vindstyrke var ca. 20 m/s i perioden 6. mars fra kl. 04.00 til kl. 07.00 (norsk normaltid).

Målingene er gjort ved målestasjonen ved Molde lufthavn. Lokasjonen ved Seterneset og målestasjonen ligger ulikt i forhold til nærliggende terreng, se Figur 54. De lokale terrengforholdene kan påvirke vindretningen noe lokalt. Vindlasten er ikke inkludert i de numeriske beregningene, og antas også å være liten siden donuten er neddykket med kun en liten del over vann.



Figur 53: Vindretning og middelvind for 6. mars 2025 målt på Molde lufthavn, 8,5 km fra Seterneset. Figur fra Norsk klimaservicesenter (seklima.met.no).



Figur 54: Molde lufthavn med land på nordsiden, og Seterneset med øya Sekken på vest- og sørvestsiden.



Vedlegg B

Tidsmidlete data (4 timer)



Bølgedata midlet over 4 tidsperioder

De midlete resultatene over de 4 tidsperiodene mellom kl. 03.00 og 07.17 er oppsummert i Tabell 4 og Tabell 5.

Tabell 4: Gjennomsnittlige bølgehøyder for perioden 6. mars fra kl. 03.00 til kl. 07.17. Se fotnoter for forklaring av de ulike høydebegrepene.

Hm0 ¹³	H3 ¹⁴	H10 ¹⁵	Hmax ¹⁶	Hmean ¹⁷
0.721	0.667	0.827	1.112	0.420

Tabell 5: Gjennomsnittlige bølgeperioder for perioden 6. mars fra kl. 03.00 til kl. 07.17. Se fotnoter for forklaring av de ulike begrepene.

Tm02 ¹⁸	Tp ¹⁹	Tz ²⁰	T3 ²¹	T10 ²²	Tmax ²³
3.101	4.791	3.364	4.069	4.189	4.185

Gjennomsnittlig bølgeretning for alle bølgene i perioden 6. mars 2025 kl. 03.00 UTC til til 6. mars 2025 kl. 07.17 UTC er 303°, altså kommer bølgene fra en nordvestlig retning. (Rent NV er 315°.) Gjennomsnittlig bølgeretning for bølgene med størst energi er 307°. Gjennomsnittlig standardavvik for bølgeretningen for bølger med størst energi i perioden er 25°.

Forskjellen mellom gjennomsnittlig retning og retningen til de mest energirike bølgene er så liten at det trolig ikke vil utgjøre nevneverdig forskjell på beregningene. Det er flere usikkerhetsmomenter knyttet til beregningene så forskjellen mellom 303° og 307° vil sannsynligvis ikke kunne kvantifiseres.

¹³ Signifikant bølgehøyde beregnet fra spekteret.

¹⁴ Gjennomsnitt av største 1/3 av bølgene beregnet fra tidsserien.

¹⁵ Gjennomsnitt av største 10% av bølgene.

¹⁶ Største bølgehøyde i perioden.

¹⁷ Gjennomsnittlig bølgehøyde.

¹⁸ Gjennomsnittlig bølgeperiode basert på bølgespekteret.

¹⁹ Perioden ved maksimal energi i bølgespekteret.

²⁰ Gjennomsnittlig nullkryssingsperiode.

²¹ Gjennomsnittlig periode for den høyeste tredjedelen av bølgene (H3).

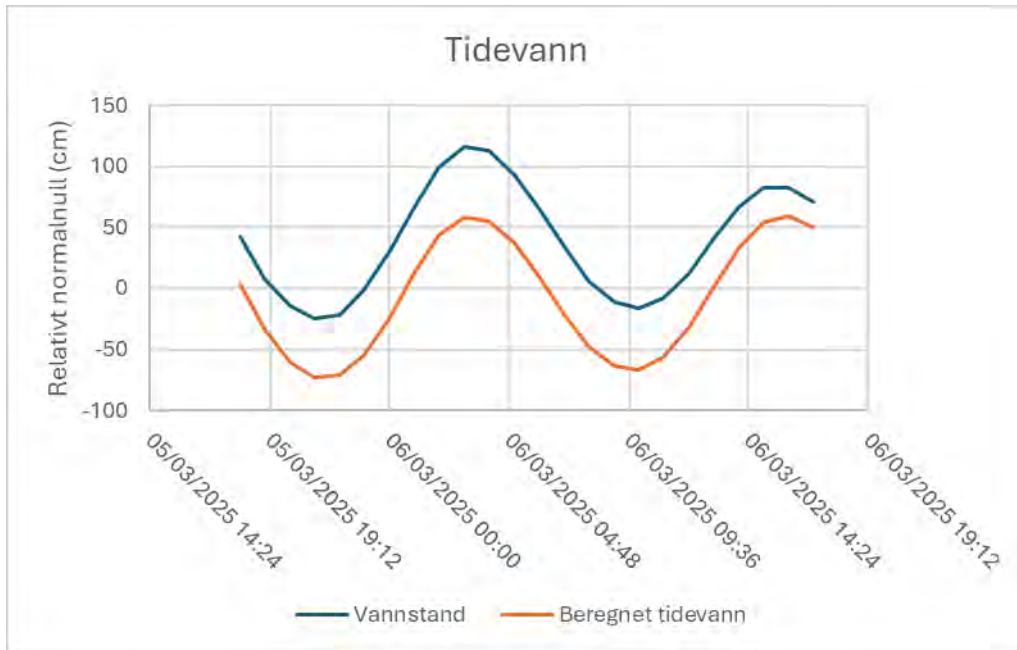
²² Gjennomsnittlig periode for de 10% høyeste bølgene (H10).

²³ Perioden til den høyeste bølgen (Hmax).



Tidevann

I perioden 6. mars 2025 kl. 02.00 til 6. mars 2025 kl. 15.00 (norsk normaltid) varierte vannstanden som følge av tidevann som vist i Figur 55. Pålandsvinden i perioden, se Vedlegg A for værdata, førte til høyere vannstand enn normalt tidevann.

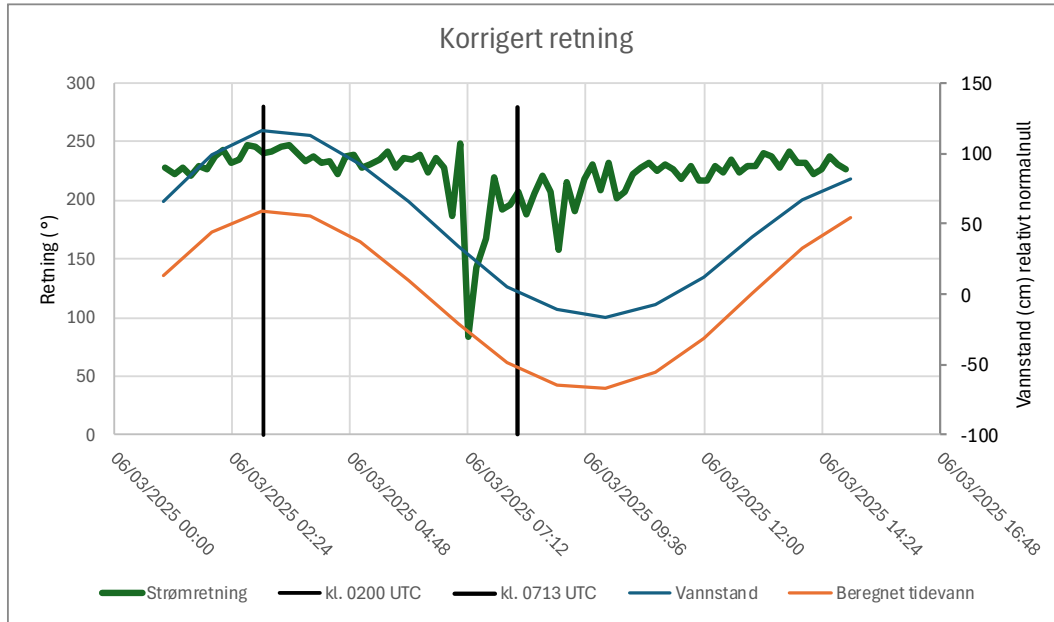


Figur 55: Beregnet tidevann og vannstand for Seterneset; 5. mars 2025 kl. 18.00-6. mars 2025 kl. 17.00.

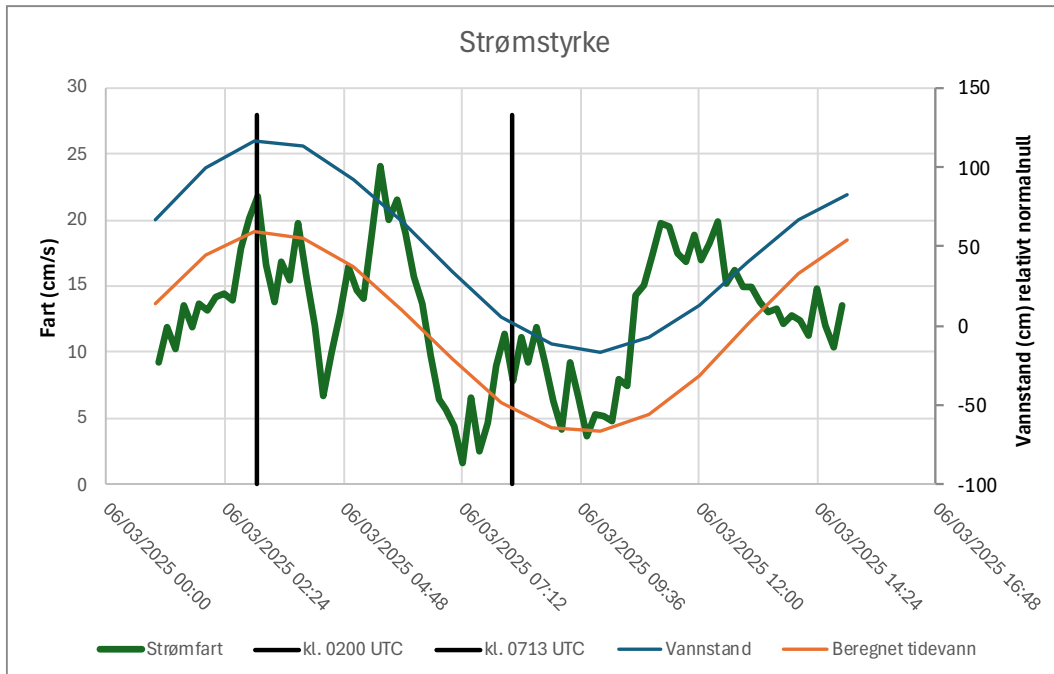
Forskjellen mellom flo og fjære er bortimot 150 cm i perioden. Åkerblå har i lokasjonsrapporten [3] analysert strømkomponenter og vist at strømmen er påvirket av tidevann.

5 meters dyp

Figur 56 viser korrigert retning for vannstrømmen mellom 6. mars 2025 kl. 01.00 og 6. mars 2025 kl. 15.00²⁴ (norsk normaltid) sammen med tidevannet. Strømretningen ser i perioden i liten grad ut til å være påvirket av flo og fjære.



Figur 56: Kompassretning for vannstrøm ved 5 meters dyp.

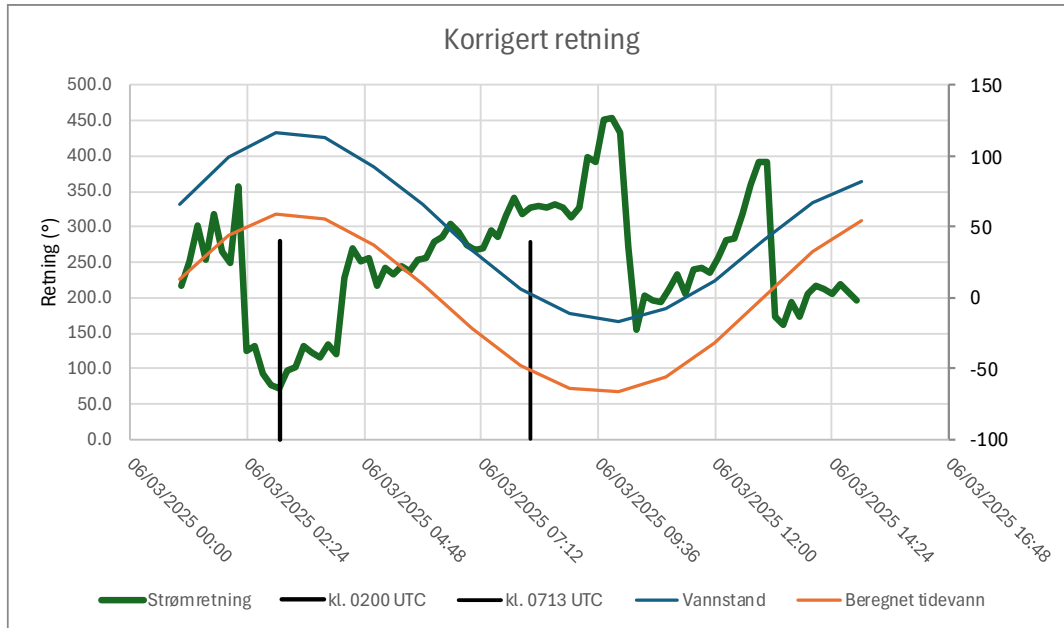


Figur 57: Vannstrømmens fart ved 5 meters dyp i cm/s

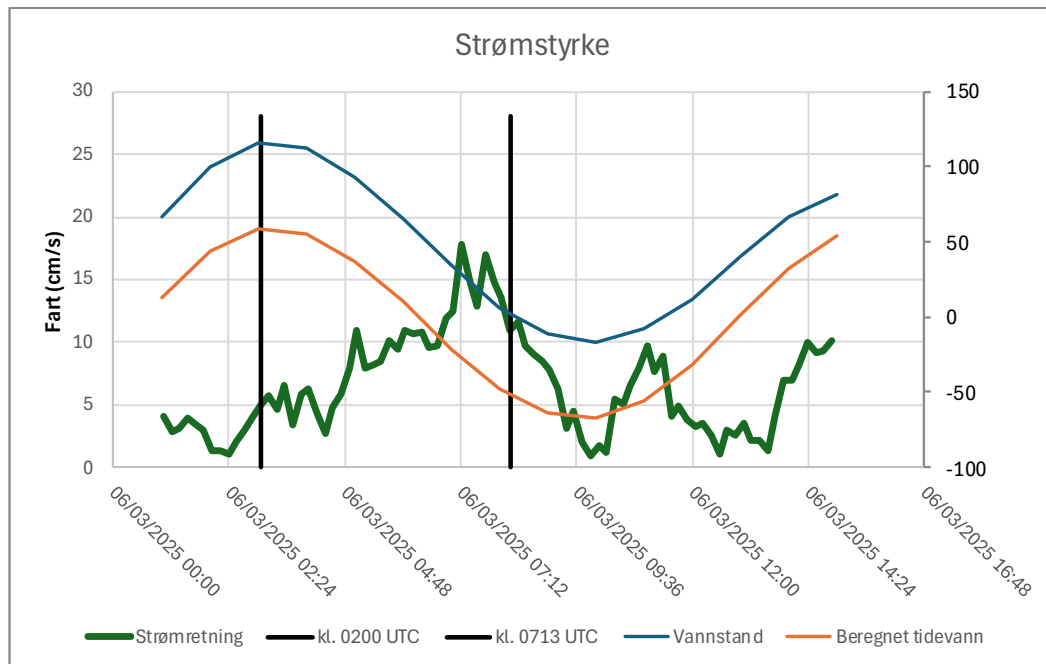
²⁴ Dette tilsvarer kl. 00.00 til kl. 14.00 UTC.

15 meters dyp

Figur 58 viser strømmens retning 6. mars. Retningen varierer gjennom dagen. Merk at 0° og 360° er samme retning (nord). Noen punkter er derfor valgt vist med større gradtall enn 360° . Det ser ut som retningen i noen grad er relatert til flo og fjære. Dette samsvarer med resultatene fra Åkerblås lokasjonsrapport [3].



Figur 58: Strømretning ved 15 meters dyp i perioden med store bølger. Noen av retningsverdiene er korrigert med 360° for å jevne ut det visuelle. (siden 0° og 360° er samme retning.) Tidevann og vannstand er vist i samme figur.



Figur 59: Strømmens hastighet i cm/s ved 15 meters dyp i perioden med store bølger. Tidevann og vannstand er vist i samme figur.

Strømdata midlet over 4 timer, 5 meters dyp

Gjennomsnittlig kompassretning for strøm ved 5 meters dyp var 223° , altså mot sørvest. Denne retningen er tilnærmet vinkelrett på anlegget (som ligger i retning 317°). I informasjon fra Åkerblå [4] er det forklart at retningen på vannstrømmen beskriver hvor vannet strømmer mot. (I motsetning til bølgene som oppgis i retningen de kommer fra.) Det vil da si at vannet ved 5 meters dyp strømmet mot land i denne perioden.

For perioden 6. mars 2025 kl. 03.00 til 07.17 UTC²⁵ var gjennomsnittlig strømretning 216° (nært rett SV) og gjennomsnittshastigheten var 11,7 cm/s. Hastigheten varierte mellom 1,6 og 24,1 cm/s (standardavviket var 6,0 cm/s). Det var stor variasjon i retningen (fra 84° til 249°), og et standardavvik på 36° . I Figur 56 ser vi at retningen er ganske konstant i en lang periode, men med stor endring mellom kl. 07.00 og 08.00 (norsk normaltid).

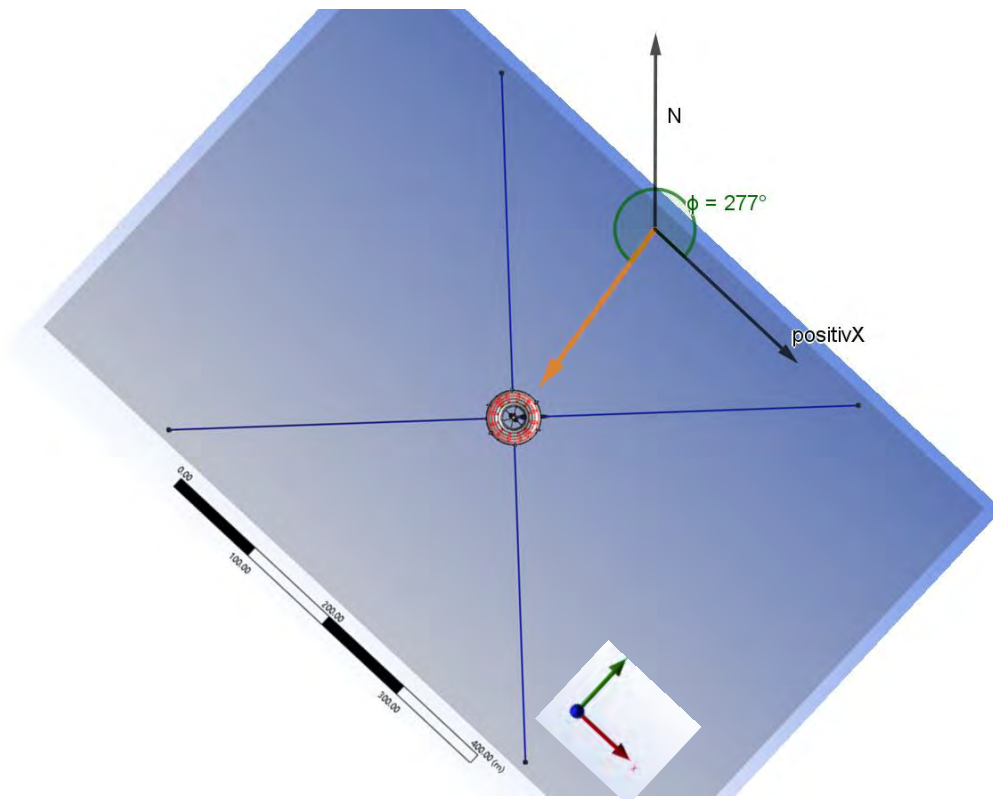
Omgjort til vinkelkoordinat i AQWA er vannstrømmens gjennomsnittlige retning mot 277° . Vannet strømmer mot sørvest (mot nær negativ y-retning i AQWA), se Figur 61.

Styrken på strømmen varierer mellom 1,6 og 24,1 cm/s. Gjennomsnittlig styrke/fart er 11,6 cm/s for perioden.



Figur 60: Strømretning ved 5 meters dyp. Gjennomsnitt for perioden 6. mars kl. 03.00 til 08.00 UTC.

²⁵ Kl. 0400 til 0817 norsk normaltid.

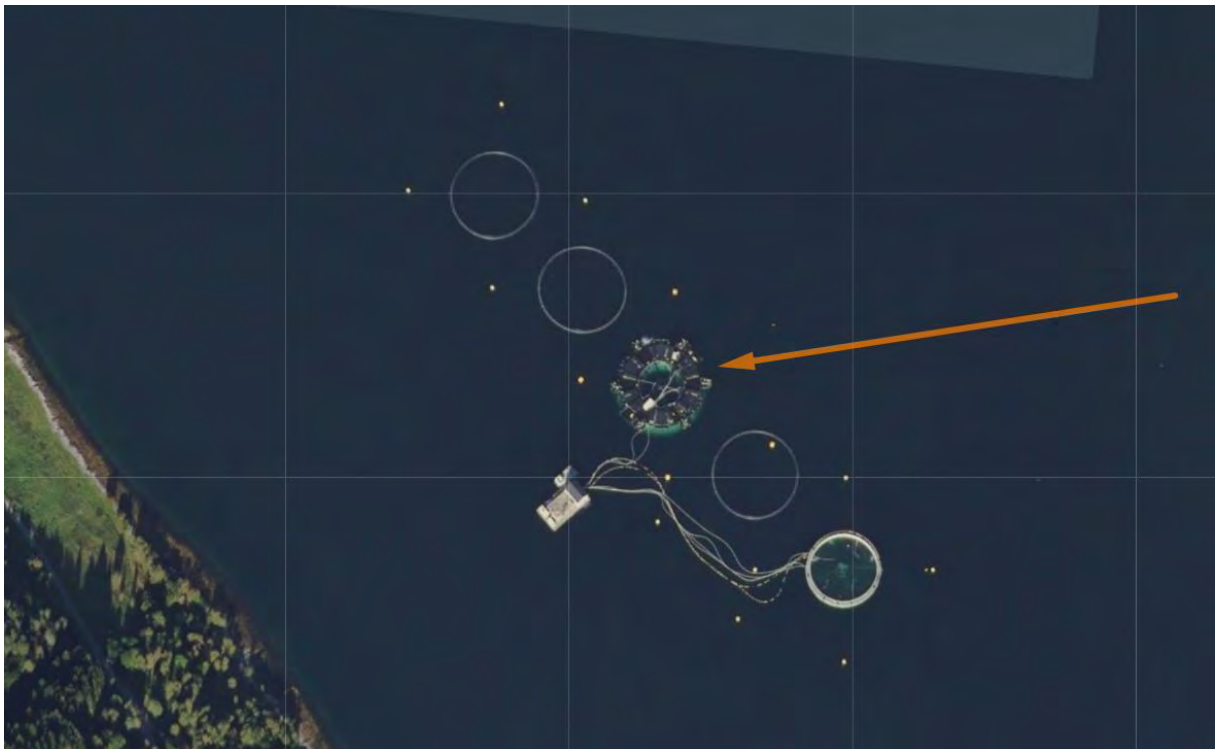


Figur 61: Strømretning ved 5 meters dyp vist i AQWA modellen for perioden kl. 03.00 til 08.00 UTC 6. mars.

Strømdata midlet over 4 timer, 15 meters dyp

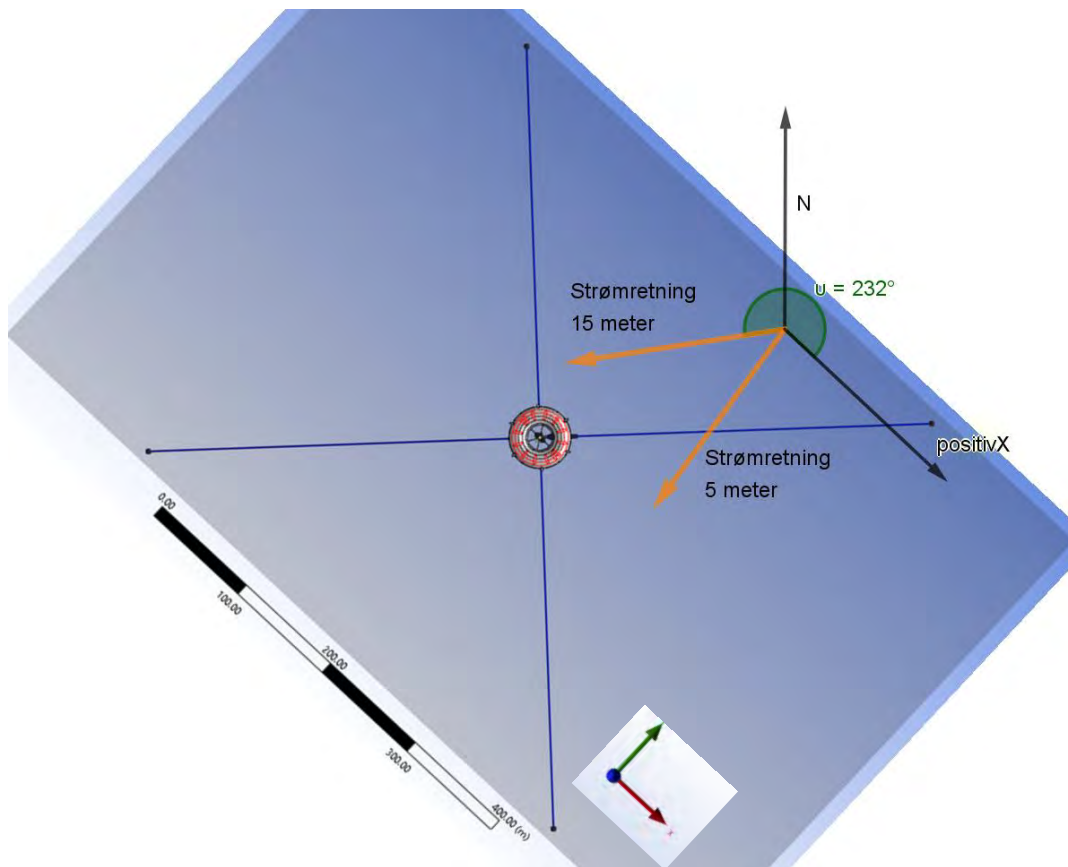
For perioden 6. mars 2025 kl. 03.00 til 07.17 UTC²⁶ var gjennomsnittlig strømretning 261° (like sør om rett vest (270°)) og gjennomsnittshastigheten var 10,8 cm/s. Hastigheten varierte mellom 2,6 og 17,7 cm/s (standardavviket var 3,6 cm/s). Det var stor variasjon i retningen (fra 50° til 342°), og et standardavvik på 50° . Strømretningen er vist i Figur 62.

Omgjort til vinkelkoordinat i AQWA er vannstrømmens retning mot 232° . Vannet strømmer nesten rett vest (mellom negativ x-retning og negativ y-retning i AQWA), se Figur 63.



Figur 62: Strømretning mot anlegget ved 15 meters dyp i perioden 6. mars kl. 03.00 til 08.17 UTC.

²⁶ Kl. 0400 til 0817 norsk normaltid.



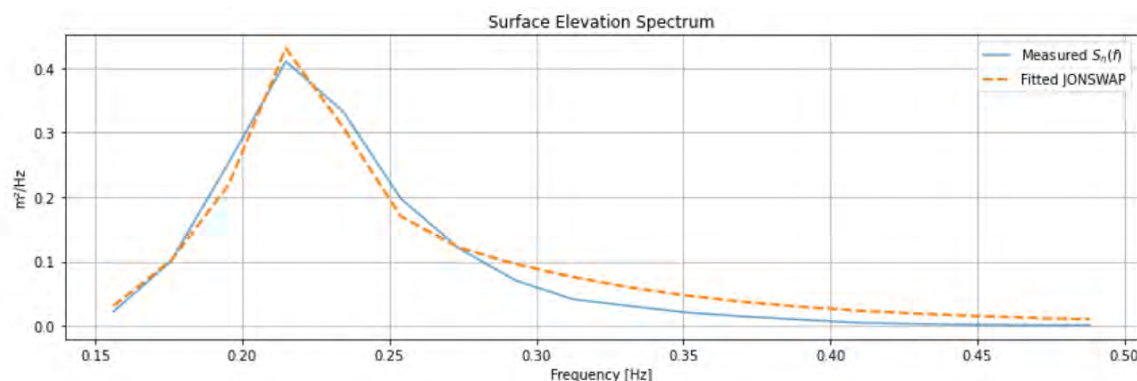
Figur 63: Strømretningene ved 5 meter og 15 meter dyp i måleperioden med store bølger (03.00 til 07.17 UTC).



Vedlegg C

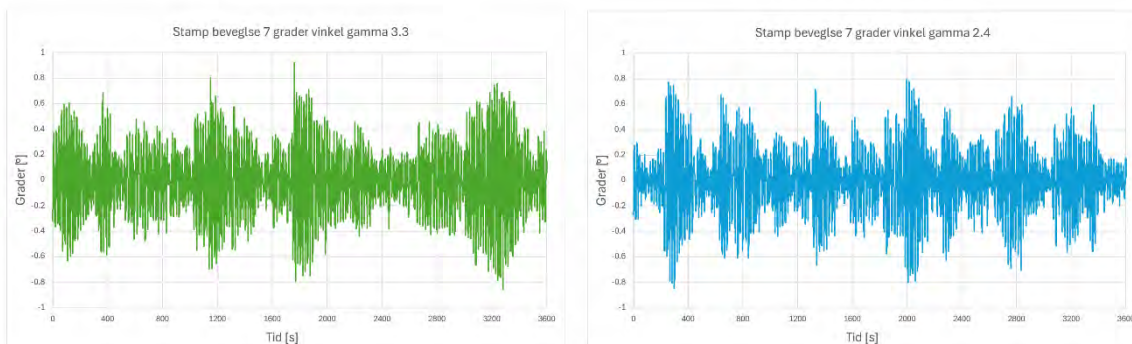
Variasjon av gamma-verdi

Trykkdataene fra Sintef Ocean ble brukt til å bestemme bølgeenergisppekteret gjennom Fourier-transformasjon. Dette ga oss en indikasjon på bølgeenergisppekteret i det lokale området. Det faktiske energisppekteret ble sammenliknet med sppekteret i JONSWAP modellen. Ved å justere gammaverdien i JONSWAP-modellen slik at det ble godt samsvar med måledataene estimerte vi gammaverdien for de målte bølgene. Figur 64 viser sammenlikningen, og at en gammaverdi på 2,4 passet de målte dataene.

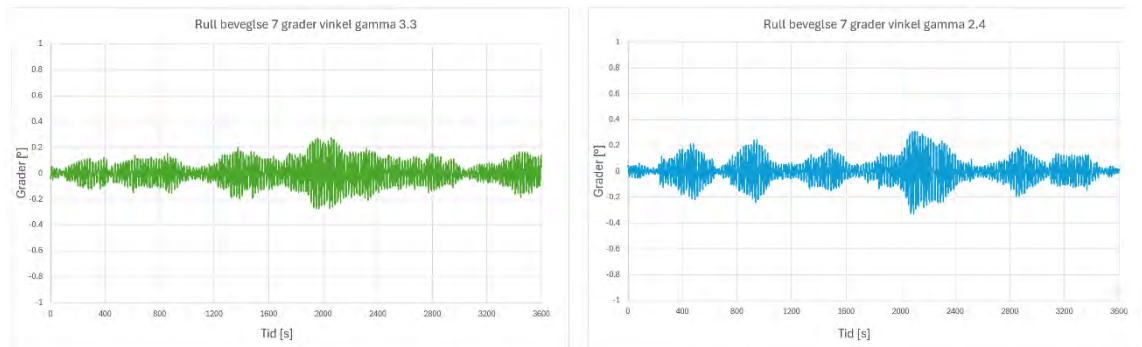


Figur 64: Energisppekteret til faktiske målingene og JONSWAP modellen.

Det er usikkerhet knyttet til denne gammaverdien. Siden trykksensoren er montert på strukturen kan man få med effekter knyttet til diffraksjon og radiering av bølger som skyldes konstruksjonen. Ved å sammenlikne beregningsresultater med den estimerte gammaverdien (2,4) med beregningsresultater med standard gammaverdi (3,3) kunne vi vurdere effekten av gammaverdi på resultatene. Figur 65 og Figur 66 viser at forskjellene for stamp og rull med ulike gammaverdier er små. Dermed er standard gammaverdi på 3,3 valgt for videre hydrodynamiske analyser.



Figur 65: Sammenlikning mellom stampresultater for ulike gammaverdier.
Venstre: gammaverdi 3,3. Høyre: gammaverdi 2,4.



Figur 66: Sammenlikning mellom rullresultater for ulike gammaverdier.
Venstre: gammaverdi 3,3. Høyre: gammaverdi 2,4.



Ranold.

Flow matters

Ranold AS

Visiting address: Hydrovegen 67, NO-3936 Porsgrunn, Norway
Postal address: P.O.Box 1045, NO-3905 Porsgrunn, Norway
T: +47 99 15 23 89 | www.ranold.com | Org.no 985 987 483 VAT

