



Rapport

Intern vannstrøm i Marine Donut – sammenligning mellom CFD analyser og fullskalamålinger

Rev 00 – 4. September 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

TEKNISK RAPPORT				
Tittel Intern vannstrøm i Marine Donut – sammenligning mellom CFD analyser og fullskalamålinger				
Rapport Nr. Ranold-2023-1578-00		Revisjonsdata 04.09.2025	Revisjonsnr. 00	
Kunde Salmar		Kundekontakt Steingrim Holm	Kundens referanse -	
Rev. Nr.	Revisjonshistorie	Dato	Forberedt	Godkjent
00	Utstedt for kommentarer	04.09.2025	BSH	MK
Navn		Dato	Signatur	
Forberedt av Bente Sannæs Helgeland		04.09.2025		
Godkjent av Marit Kleven		04.09.2025		



Innholdsfortegnelse

1	INTRODUKSJON	5
2	STRØMNINGSMÅLINGSFORSØK	6
2.1	PROSEDYRE	6
2.2	USIKKERHETSMOMENTER	8
3	OPPSETT AV CFD-MODELL	10
3.1	VANNETS EGENSKAPER	10
3.2	GEOMETRI MODELLERT VS. REELL	10
3.2.1	<i>Strømsettere</i>	<i>10</i>
3.2.2	<i>Plassering av strømsettere</i>	<i>11</i>
3.2.3	<i>Strømsettertårn</i>	<i>12</i>
3.2.4	<i>Gittere</i>	<i>13</i>
3.2.5	<i>Utløp</i>	<i>13</i>
3.3	GRENSEBETINGELSER MODELLERT VS. REELL	14
3.3.1	<i>Inntakspumper</i>	<i>14</i>
3.3.2	<i>Strømsettere</i>	<i>14</i>
3.3.3	<i>Beregning av aksial hastighet</i>	<i>15</i>
3.3.4	<i>Roterende strømning fra strømsetterne</i>	<i>15</i>
3.3.5	<i>Utløp</i>	<i>15</i>
4	SAMSVAR MÅLINGER VS. CFD	16
4.1	RESULTATER – 2023	16
4.1.1	<i>100% modus for strømsettere</i>	<i>16</i>
4.1.2	<i>60% modus for strømsettere</i>	<i>16</i>
4.2	RESULTATER – 2024	17
4.2.1	<i>100% modus for strømsettere</i>	<i>17</i>
4.2.2	<i>60% modus for strømsettere</i>	<i>17</i>
4.3	USIKKERHETSMOMENTER IFM. SAMMENLIGNING CFD VS. MÅLINGER	18
4.4	RASJONALE FOR CFD	18
5	SAMSVAR MED OG UTEN BIOMASSE	19
6	LÆRINGSUTBYTTE	20
7	REFERANSER	21



Figurliste

FIGUR 1: TORUS SOM VISER DE TO ROTASJONSRETNINGENE. HOVEDRETNINGEN ER VIST MED BLÅ PIL OG RETNINGEN PÅ TVERS ER VIST MED RØD PIL.....	5
FIGUR 2: TEKNISK TEGNING AV MD, HVOR STRØMSETTERTÅRN ER MARKERT MED BLÅ KRYSS OG LUKENE BENYTTET FOR STRØMNINGSMÅLINGER ER MARKERT MED GULE TALL, HHV. 3, 6 OG 14.....	7
FIGUR 4: MD SETT OVENFRA (FORTSATT PÅ BYGGEPLASS) MED MARKERINGER AV X1, X2 OG X3 FOR HHV. LUKE 3, 6 OG 14, UTKLIPP FRA BGF SIN PRESENTASJONSVIDEO AV MD [4].....	8
FIGUR 3: CFD-MODELL HVOR DE DELENE AV MANTELEN SOM DEKKER INNSIDEN AV MD ER UTELATT. MODELLEN VISER STRØMSETTERPLASSERINGEN FOR MÅLINGENE FRA 2024, MED DEN LAVESTE PLASSERINGEN AV STRØMSETTERNE.....	11
FIGUR 4: STRØMSETTERPLASSERING MED MARKERING AV HØYDE FOR MÅLEPUNKTER. VENSTRE: ORIGINAL (2023) PLASSERING. HØYRE: SENKET PLASSERING, 1200 MM LAVERE (2024).....	12
FIGUR 5: GITTER OG ØVRIG STRUKTUR I STRØMSETTERTÅRN, SETT SKRÅTT NEDENFRA.....	13

Tabelliste

TABELL 1: FORHOLDET MELLOM BEREGNET OG MÅLT X-HASTIGHET FOR 100% MODUS (BEREGNET/MÅLT). FARGESKALAEN ER GRADERT FRA MINSTE (RØD) TIL STØRSTE (GRØNN) FORHOLD MELLOM BEREGNET OG MÅLT X-HASTIGHET.....	16
TABELL 2: FORHOLDET MELLOM BEREGNET OG MÅLT X-HASTIGHET FOR 60% MODUS (BEREGNET/MÅLT). FARGESKALAEN ER GRADERT FRA MINSTE (RØD) TIL STØRSTE (GRØNN) FORHOLD MELLOM BEREGNET OG MÅLT X-HASTIGHET.....	17
TABELL 3: FORHOLDET MELLOM BEREGNET OG MÅLT X-HASTIGHET FOR 100% MODUS (BEREGNET/MÅLT). FARGESKALAEN ER GRADERT FRA MINSTE (RØD) TIL STØRSTE (GRØNN) FORHOLD MELLOM BEREGNET OG MÅLT X-HASTIGHET.....	17
TABELL 4: FORHOLDET MELLOM BEREGNET OG MÅLT X-HASTIGHET FOR 60% MODUS (BEREGNET/MÅLT). FARGESKALAEN ER GRADERT FRA MINSTE (RØD) TIL STØRSTE (GRØNN) FORHOLD MELLOM BEREGNET OG MÅLT X-HASTIGHET.....	18
TABELL 5: FORHOLDET MELLOM HASTIGHET MED OG UTEN FISK VED 100% STRØMSETTERKAPASITET. FARGENE INDIKERER AVSTAND FRA GJENNOMSNITTLIG HASTIGHETSFORSKJELL (87%).....	19
TABELL 6: FORHOLDET MELLOM HASTIGHET MED OG UTEN FISK VED 60% STRØMSETTERKAPASITET. FARGENE INDIKERER AVSTAND FRA GJENNOMSNITTLIG HASTIGHETSFORSKJELL (70%).....	19

1 INTRODUKSJON

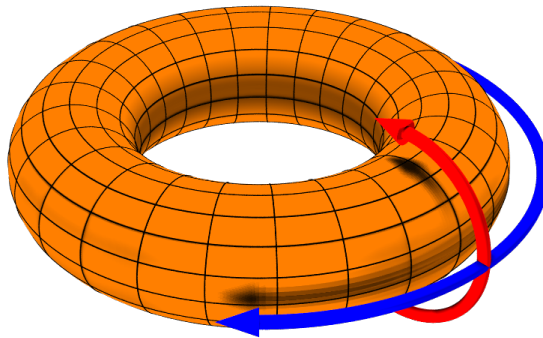
Bluegreen Fusion (BGF) har levert en ny type flytende og lukket oppdrettsmerd til SalMar. Anlegget er formet som en torus (smultring) og går under betegnelsen Marine Donut (MD). Oppdrettsanlegget har vært gjennom produktsertifisering iht. NS 9415:2021 og ligger nå på lokasjon på Sekken, en øy i Molde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

Ranold AS har tidligere assistert i designfasen av MD, både med detaljerte CFD¹ beregninger for å verifisere og optimalisere den interne strømmingen inni mantelen for økt fiskevelvære, og med hydrodynamiske responsanalyser i forbindelse med produktsertifisering.

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 1600 prosjekter siden oppstart. Ranold benytter programvare fra den anerkjente leverandøren ANSYS, versjon 2022R2 (eller nyere); ANSYS AQWA og ANSYS FLUENT.

Fokuset i de detaljerte strømningsanalysene har vært å svare på hva slags hastighetsfelt som oppnås inni mantelen, hvordan oksygenfordelingen i vannet blir, hvordan fôr fordeler seg og hvor effektivt slampartikler fjernes. I tillegg har Ranold regnet på prosessen rundt fisketømming for å se når brønnbåten vil suge luft i forbindelse med tømming.

En torus har to rotasjonsretninger. For ordens skyld presiseres det at for beskrivelsen av strømning i MD er hovedstrømretningen alltid i retning langs den blå pila i Figur 1.



Figur 1: Torus som viser de to rotasjonsretningene. Hovedretningen er vist med blå pil og retningen på tvers er vist med rød pil.

Plassert på Seterneset har det vært utført strømmålingsforsøk i MD for å verifisere det beregnede hastighetsfeltet. Det er selskapet Aqua Kompetanse AS som har stått for målingene.

Ranold AS har assistert SalMar med en samsvarsvurdering mellom hastighetsmålinger og beregnede verdier fra CFD. Samsvarsvurderingen danner grunnlag for å vurdere om teori (CFD-analysene) og praksis stemmer overens, og hvordan CFD kan bidra i design- og forbedringsprosesser.

Vurderinger og funn fra dette arbeidet er summert i denne rapporten.

¹ CFD=Computational fluid dynamics; numeriske strømningsberegninger



2 STRØMNINGSMÅLINGSFORSØK

2.1 Prosedyre

Målingene har blitt utført for syv ulike moduser:

- Målinger utført i desember 2023 [1]:
 - 60% strømsetterkapasitet – 13. desember 2023
 - 100% strømsetterkapasitet – 14. desember 2023
- Målinger utført i september 2024 [2] (med fisk i anlegget):
 - 60% strømsetterkapasitet med fisk – 18. september 2024
 - 100% strømsetterkapasitet med fisk – 17. september 2024
- Målinger utført i desember 2024 [3]:
 - 60% strømsetterkapasitet – 3. desember 2024
 - 100% strømsetterkapasitet – 4. desember 2024
 - 120% strømsetterkapasitet – 5. desember 2024

Det ble foretatt målinger på 27 ulike måleposisjoner [1][2][3][6]. Disse er fordelt på 9 ulike måleposisjoner i luke nummer 3, 6 og 14 i tråd med anleggets nummerering (se Figur 2):

- Luke 3: lokalisert like nedstrøms strømsetttertårnet ved kontrollkontaineren (markert med blått kryss i Figur 2)
- Luke 6: lokalisert midtveis mellom de to strømsetttertårnene
- Luke 14: lokalisert like oppstrøms strømsetttertårnet ved kontrollkontaineren (markert med blått kryss i Figur 2)

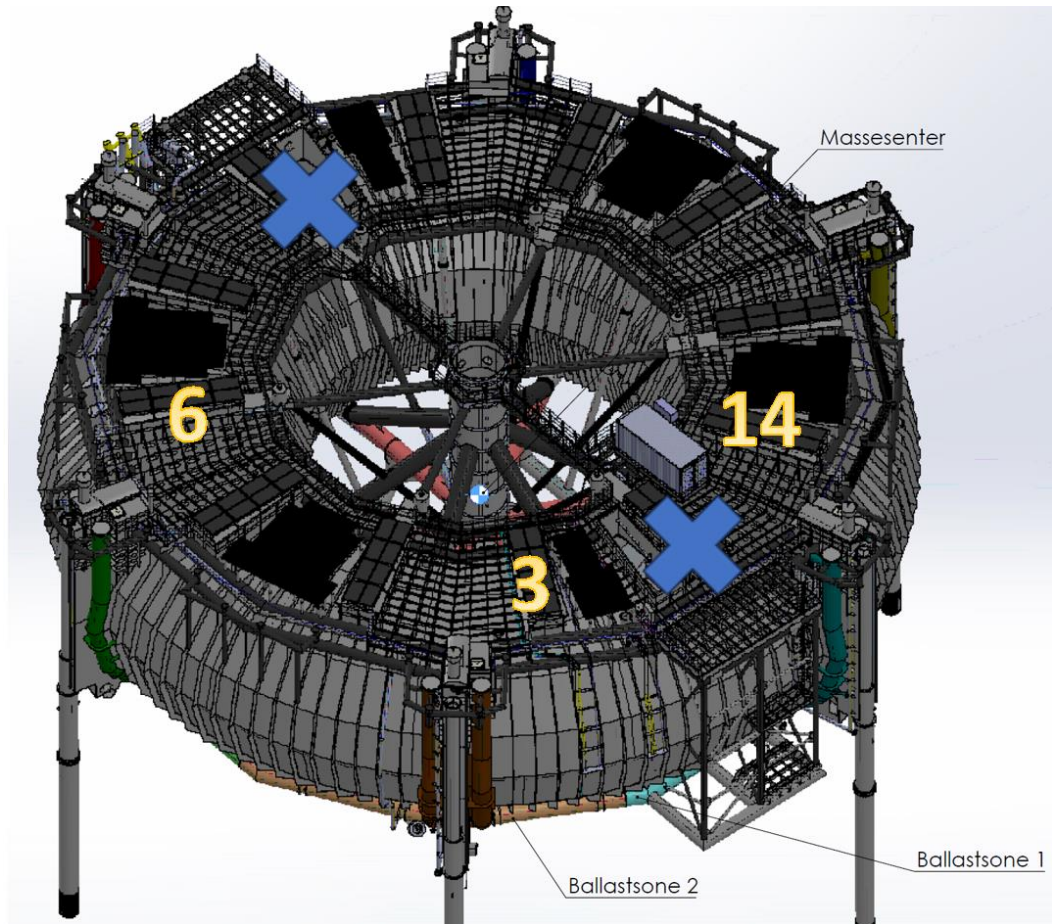
I hver av de tre lukene ble tre hastighetsmålere montert på en stang som ble festet i lukekarmen [6]. Hastighetsmålerne ble montert på tre dyp ved tre horisontale posisjoner (langs lukekarmen tilnærmet radielt fra senter av MD), illustrert i Figur 3:

- X1: Innerste hjørne av lukekarmen
- X2: Midt mellom indre og ytre posisjon langs lukekarmen
- X3: Ytterste hjørne av lukekarmen

Omtrentlig dybder for hver av de radielle posisjonene var som følger, basert på avstand fra lukekarmen og en avstand på ca. 1,8 m ned til vannflaten fra lukekarmen:

- Y1: 2 meters dyp
- Y2: 7 meters dyp
- Y3: 12 meters dyp

Måleposisjonene i dybden er verifisert ved trykkmålinger som angir den hydrostatiske væskesøylen over måleposisjonen.

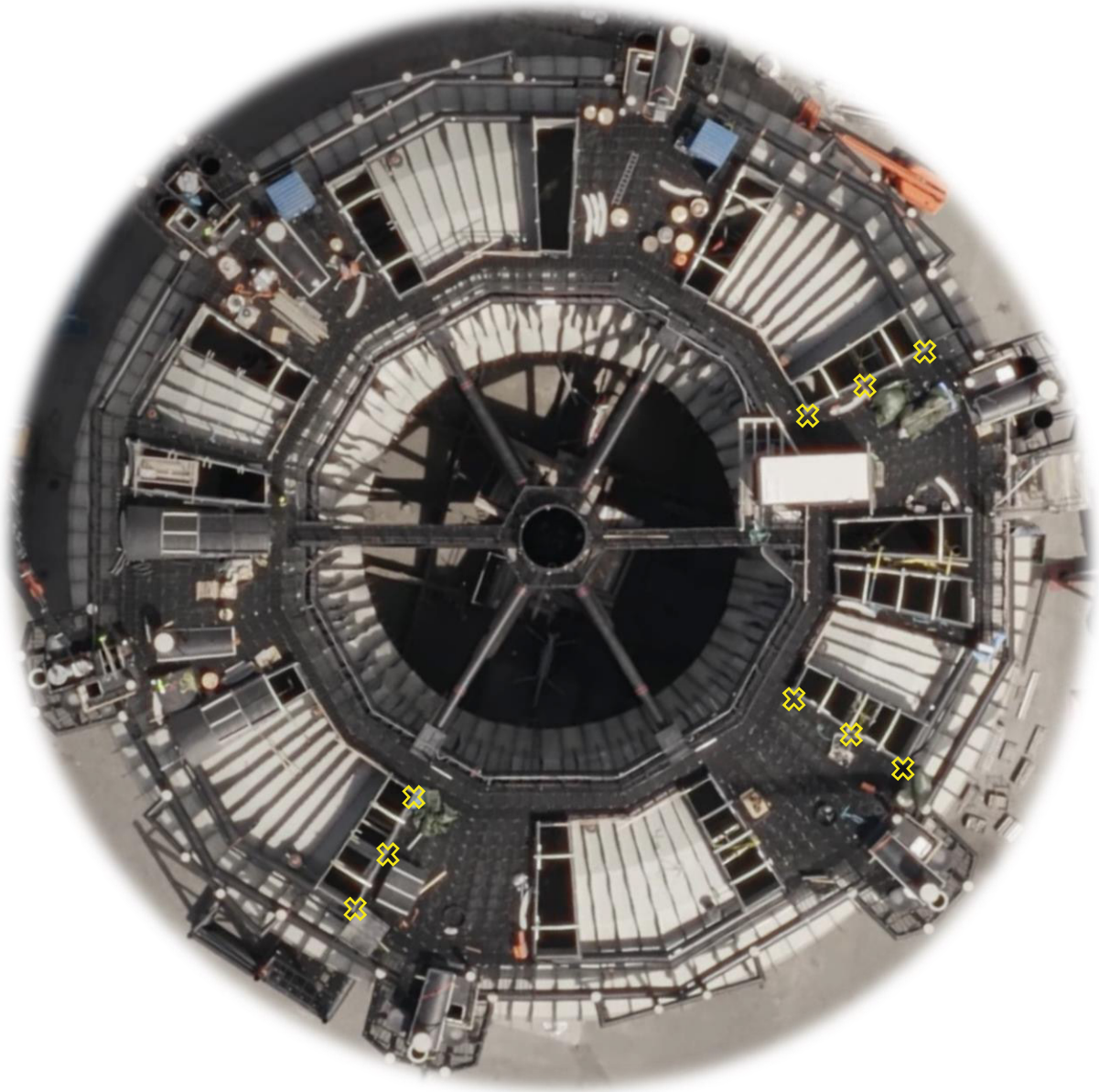


Figur 2: Teknisk tegning av MD, hvor strømsettertårn er markert med blå kryss og lukene benyttet for strømningsmålinger er markert med gule tall, hhv. 3, 6 og 14

Målerne angir hastighetskomponentene i x-, y- og z-retning der disse er definert som:

- x-retning: hovedretningen til strømmingen i MD, dvs. tilnærmet normalt på lukekarmen
- y-retning: horisontalkomponent på tvers av strømmingen i MD, dvs. tilnærmet radielt, parallelt med lukekarmen
- z-retning: vertikalt, i dybden

Ved analyse av dataene har Aqua Kompetanse fjernet datapunkter der måleverdiene avviker vesentlig fra resten av målingene [1][2][3].



Figur 3: MD sett ovenfra (fortsatt på byggeplass) med markeringer av X1, X2 og X3 for hhv. luke 3, 6 og 14, utklipp fra BGF sin presentasjonsvideo av MD [4]

2.2 Usikkerhetsmomenter

Det er særlig usikkerhet knyttet til målingene i luke 6 [6]. Her var det mer bevegelse i måleriggen siden lukekonstruksjonen var slik at riggen ikke kunne festes til karmen i luken. Flere målinger er derfor slettet herfra sammenlignet med de to andre lukene. Usikkerhetsmomenter er dokumentert i rapportene fra Aqua Kompetanse [1][2][3]. Målingene anses imidlertid å gi et tilstrekkelig statistisk fundament.



Hastighetsmålerne registrerer også trykket. Dette ble brukt til å bestemme den hydrostatiske væskekolonnen over målepunktet, og ble brukt til å finne omtrentlig dybdeplassering på 4, 9 og 14 meter målt fra toppen av lukekarmen. Basert på omtrentlig 1,8 meter målt ned til vannflaten fra lukekarmen gir dette de målte vanndybde (Y1, Y2 og Y3) som angitt i kapittel 2.1.

Målerne registrerer i tillegg heading, pitch og roll. Heading er kompassretningen av målerens x-retning. Pitch og roll angir vertikalt avvik fra loddrett langs hhv. y- og x-retningene. Roll (sideveis rotasjon) vil ikke påvirke målingene i hovedstrømretningen (x) når måleren er orientert riktig relativt luken, men vil gi en endret verdi i y- og z-retningene. Pitch (rotasjon langs hovedstrømretningen ved riktig orientert måler) vil påvirker målingene i x- og z-retningene. Analyse av dataene for pitch og roll viste at målerens posisjon vanligvis avvek med mindre enn 10° fra vertikal posisjon, men at de i noen tilfeller avvek opp til 30°. Dette medfører at målt hastighet ikke er dekomponert langs de antatte aksene. De målte verdiene kan koordinattransformeres slik at hastigheten er dekomponert i de valgte retningene.

Heading har vært brukt til å kvalitetssikre at målerens x-komponent er i torusens hovedretning, og til å koordinattransformere x- og y-komponentene for roterte målere. En fullstendig koordinattransformasjon som korrigerer målingene også for pitch og roll er ikke gjennomført.

Korrigerings for rotasjon og feilplassering av målere anses som viktig for å ha et godt valideringsgrunnlag.



3 OPPSETT AV CFD-MODELL

3.1 Vannets egenskaper

Så lenge det kun er én-fase vann som simuleres og CFD-beregningene skal gi svar på hastighetsfeltet, så spiller det mindre rolle hva slags tetthet vannet defineres med. Husk imidlertid på at dette er viktig når man skal vurdere selvrensing og/eller fôrdistribusjon.

3.2 Geometri modellert vs. reell

Ranold har utført strømningsberegninger for BGF som en del av designfasen, og har vært med på å videreutvikle og forbedre strømningsmønsteret i MD. De analysene som ble utført i designfasen er ikke gyldige for det designet man til slutt endte opp med, bygde og som det har blitt utført målinger på. Justeringer som skjer underveis i et prosjekt er viktig å være klar over, vurdere viktigheten av, og oppdatere strømningsmodelleringen om endringene anses som vesentlige. Eksempelvis ble det gjort store endringer på pumpeinnløpene fra starten av prosjektet til hva som ble bygget.

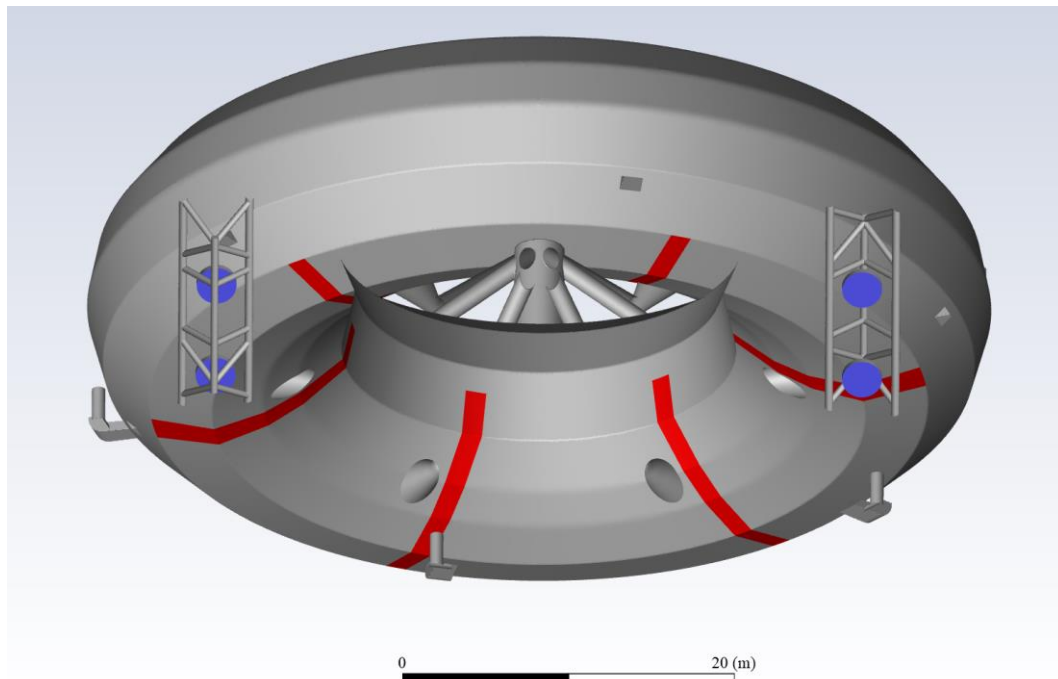
Det bør også nevnes at MD ble utsatt for noe deformasjon før den ble neddykket på lokasjon. Tverrsnittsarealene som er tilgjengelig for strømning regnes å være intakte, men enkelte områder kan ha blitt tilført en ovalitet som avviker fra geometrien som benyttes i CFD-beregning. Det antas at deformasjonen ikke påvirker resultatene i noen vesentlig grad, men det kan være verdt å merke seg.

En geometri bygget for CFD-beregninger vil stort sett alltid etableres med noen forenklinger for å unngå et uforholdsmessig stort antall regneceller (mesh). Det er spesielt elementer som er små relativt den sentrale geometrien som forenkles. Disse har ofte liten innvirkning på strømningsmønsteret i beregningsområdet. Det gjøres faglige vurderinger av hvilke elementer som bør inkluderes med detaljer, og hvilke som kan utelates eller forenkles.

De viktigste betraktningene og forenklingene beskrives i de neste avsnittene.

3.2.1 Strømsetterne

Det som setter fart på vannet inni mantelen er de fire strømsetterne, hvor to og to er plassert vertikalt over hverandre på hver sin side av ringen, se Figur 4. De blå flatene representerer de modellerte strømsetterne, som utløp/innløp av beregningsdomenet.



Figur 4: CFD-modell hvor de delene av mantelen som dekker innsiden av MD er utelatt. Modellen viser strømsetterplasseringen for målingene fra 2024, med den laveste plasseringen av strømsetterne.

Strømsetterne har ikke vært modellert i detalj, men som et tomrom i det volumet som propellbladene roterer i, dvs. en sylinder med diameter 2,5 m. Det settes en gitt hastighet basert på volumraten av vann som strømsetteren skyver inn i beregningsdomenet i ene enden av sylindere og ut av domenet i den andre enden av sylindere.

Sylindere opptar omtrent det samme volumet som propellene dekker når de roterer. Det er to hovedårsaker til å forenkle modelleringen av strømsetterne:

- Spare beregningstid ved å slippe å beregne bladposisjonen som funksjon av tid samtidig som effekten av propellene inkluderes
- Detaljert bladgeometri er ikke kjent (Det er vanlig at leverandører ikke ønsker å gi fra seg 3D CAD-filer)

3.2.2 Plassering av strømsetterne

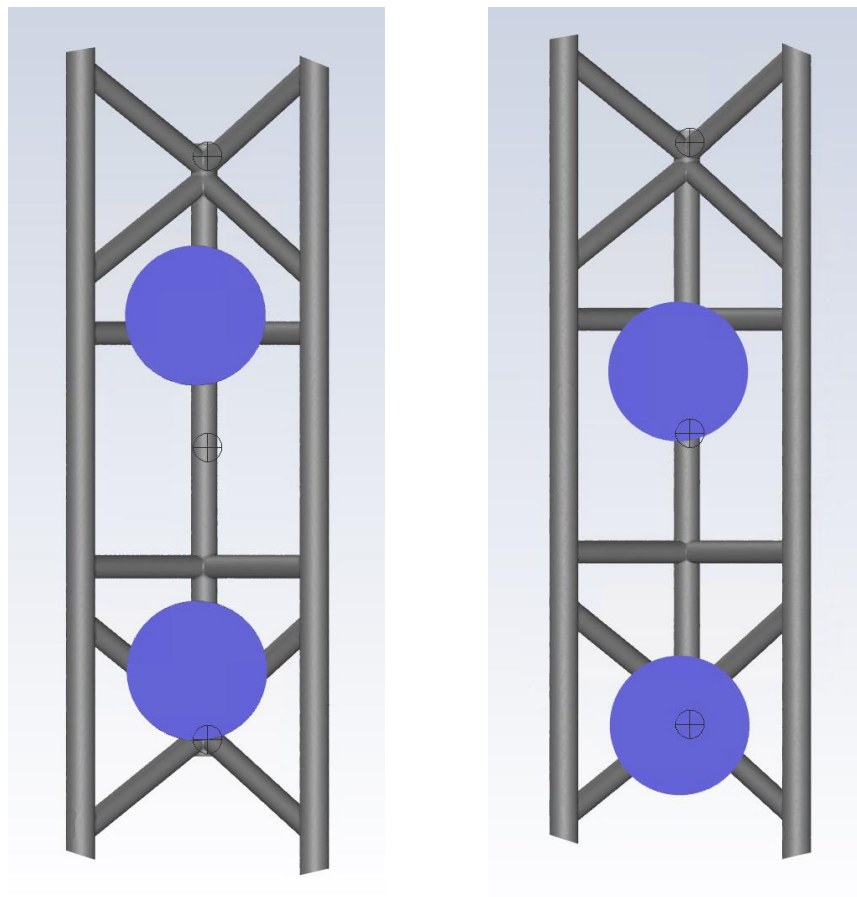
Underveis i samsvarsvurderingen ble det avdekket at strømsetterne ikke var plassert på samme høyder som i den bygde MD, et avvik som ble vurdert som så vesentlig at beregningene ble justert til reelle høydeplasseringer sammenlignbar for målingene i 2023.

Videre ble det i forkant av innfylling av fisk i 2024 gjort en ytterligere justering av beregningsmodellen – nå for å hensynta en faktisk senkning av strømsetterne. Før innsetting av fisk og gjennomføring av måleseriene i september 2024 med fisk, og i desember 2024 uten fisk ble strømsetterne flyttet til en lavere posisjon [7]. De lave nivåene ble brukt i simuleringene som ble sammenlignet med måleseriene fra 2024.

Det nederste målepunktet var plassert på høyde med nedkanten av nedre strømsetter. Ved senket strømsetter kom nivået omtrent på høyde med midten av strømsetteren.

Det midterste målepunktet var plassert et stykke nedenfor den øvre strømsetteren. Ved senket strømsetter kom nivået i nedkant av den øvre strømsetteren.

Figur 5 viser et strømsettertårn med de to ulike plasseringene av strømsetterne (blå sirkler). Målepunktenes høyde er markert med svarte sirkler med kryss, og plassert midt foran tårnene.



Figur 5: Strømsetterplassering med markering av høyde for målepunkter. Venstre: original (2023) plassering. Høyre: senket plassering, 1200 mm lavere (2024).

3.2.3 Strømsettertårn

Sammenlignet med de faktiske strømsettertårnene som er vist i Figur 6 ble en stor del av geometrien utelatt i de første beregningene. I hovedsak var kun de vertikale søylene inkludert. Slik forenkling er typisk i designfasen – da bygde detaljer er (fortsatt) ukjente og man vurderer «det store bildet» samt ser etter relative forskjeller ved designvariasjoner av større betydning.



Figur 6: Gitter og øvrig struktur i strømsettertårn, sett skrått nedenfra

Underveis i samsvarsvurderingen ble flere detaljer i strømsettertårnene inkludert, som skråstag á Ø500 mm og de horisontale tverrstagene. Disse virker som obstruksjoner på strømmingen. I tillegg ble dimensjonene justert til hva som faktisk ble bygd. Figur 5 viser strukturene som ble inkludert i simulering.

3.2.4 Gittere

En vanlig forenkling er også at man ikke løser opp de geometriske detaljene der man har noen form for gitter, hullplater e.l. Da er det vanlig å isteden modellere trykkfallet over den flaten med en representativ motstandskoeffisient hentet fra litteraturen. For «burene» omkring strømsetterne kunne dette vært en mulighet. Hvis strømningsbegrensningen antas å være veldig begrenset kan man kan velge å se bort fra restriksjonene.

Gitrene omkring propellene har en relativt høy lysåpning (~90%). Disse antas ikke å utgjøre motstand av signifikant betydning i CFD-beregningen og har derfor blitt utelatt i beregningene.

3.2.5 Utløp

Foran utløpsrørene som transporterer vannet ut i senter av MD er det montert utløpsrister som hindrer fisken i å rømme. Det ble tidlig besluttet at disse åpningene skulle modelleres som 100% åpne. Trykkfallet over de relativt åpne ristene ble vurdert som lite viktig pga. stor lysåpning. Trykkfallet vil også være likt over alle åpningene hvis strømmingen er lik, og strømningsmønsteret i mantelen forventes derfor ikke å være påvirket av om det er rister eller ikke foran disse åpningene.

Slamfellene ble, på den annen side, modellert med en representativ motstand. De røde sonene i Figur 4 viser utstrekningen for slamfellene, men løser altså ikke opp den detaljerte geometrien. I



senere beregninger er utløpet til slamfellene ikke inkludert siden mengden vann som strømmer ut gjennom disse er liten i forhold til hovedutløpene.

3.3 Grensebetingelser modellert vs. reell

3.3.1 Inntakspumper

Friskt vann tilføres MD fra 6 pumper jevnt fordelt omkring omkretsen. Loggdata har vist at pumpenes bidrag ikke er identiske. I beregningene settes raten lik, og til en verdi som gir ønsket utskiftningsrate av vannet. Forskjellen mellom pumpenes bidrag er ikke vesentlig slik at det å sette lik rate er en god tilnærming.

3.3.2 Strømsettere

Det er en utfordring å definere gode grensebetingelser for hastigheten ut fra strømsetterne. Disse ble modellert som en hastighet inn i domenet fra den ene siden av sylindren, og som et sug ut fra domenet på den andre siden (negativ hastighet). Underveis i samsvarsvurderingen viste det seg at installert type mikser var en annen enn den som ble benyttet i designfasen – med noen lavere maksimal effekt, noe som gir utslag også for modelleringen. Dette ble derfor endret i videre simuleringer.

Beregningen av hastigheten har vært gjenstand for endringer. Man endte opp med å beregne hastighetene basert på skyvekraften (trust) oppgitt fra leverandøren av mikserne. Propellen modelleres da som en sirkulær flate som representerer det området hvor skyvekraft (T) og tilført effekt (P) virker på væsken. Dette er en forenklet, men effektiv måte å representere propellens virkning på strømningsfeltet uten å inkludere de komplekse geometriske detaljene av propellen.

Vannets aksialhastighet (V_a) ut fra propellen er en funksjon av skyvekraften (T) og uttrykt som:

$$V_a = \sqrt{\frac{T}{\rho \cdot A}} \quad \text{Likning 1}$$

ρ er væskens tetthet og A er arealet av den sirkulære flaten som propellen dekker når den roterer.

Denne tilnærmingen er godt egnet i CFD-simuleringer fordi den gir et godt estimat på hvordan propellen påvirker strømningsfeltet, samtidig som den holder beregningskostnadene nede. Å modellere propellen som en sirkulær flate gjør det mulig å beregne strømmingen uten å inkludere alle geometriske detaljer, noe som ellers ville krevd langt mer komplekse beregninger. Selv om dette er en forenkling, gir metoden verdifulle resultater for å analysere aksialhastighet, virkningsgrad og energitap. Dette gjør det lettere å forstå hvordan propellen påvirker strømmingen, og den kan brukes for å optimalisere utformingen og plasseringen av propellen eller strømsetteren, for eksempel for å sikre et jevnt strømningsfelt eller redusere energiforbruket.

I tillegg til å beregne aksialhastigheten, er det også mulig å evaluere propellens virkningsgrad (η), som beskriver hvor effektivt den tilførte effekten (P) omdannes til nyttig skyvekraft. Dette beregnes ved hjelp av ligningen:

$$\eta = \frac{T \cdot V_a}{P} \quad \text{Likning 2}$$

Virkningsgraden påvirkes av flere faktorer som fører til energitap, noe som betyr at ikke all tilført effekt bidrar til aksial strømming.



3.3.3 Beregning av aksiell hastighet

I punkt «8.1.2 Program» i måleprogrammet for vannstrøm i MD, godkjent av Fiskeridirektoratet, står det at målingene skal gjennomføres ved 60% og 100% trust på strømsetterne [4]. Den maksimale rotasjonshastigheten er opplyst fra leverandøren av strømsetteren, og 100% trust settes opp mot denne.

100% trust

Basert på oppgitt skyvekraft fra leverandøren av strømsetteren for rotasjonshastigheten ved 100% trust beregnes en aksiell hastighet og virkningsgraden beregnes fra Likning 2.

60% trust

60% trust (skyvekraft) relativt den oppgitte skyvekraften fra leverandøren beregnes, og man finner tilhørende rotasjonshastigheter fra tabulerte verdier fra strømsetter-leverandør. Dette tilsvarer en redusert rotasjonshastighet for 60% trust-beregningen. Likning 1 og Likning 2 gir da hhv. aksiell hastighet og virkningsgrad.

3.3.4 Roterende strømning fra strømsetterne

Strømsetternes rotasjon tilfører væsken en roterende bevegelse ut fra strømsetteren. Væskens rotasjonshastighet vil være mindre enn propellens rotasjonshastighet pga. treghet. Når væsken har en roterende bevegelse ut fra strømsetterne «forstyrres» væskestrømmen langs torusen. Dette er med på å redusere den gjennomsnittlige væskehastigheten. I tidlige beregninger ble ikke effekten av væskens rotasjon nedstrøms strømsetterne tatt med, og CFD hastighetene var for høye sammenlignet med målte verdier.

Ulike propeller vil påvirke væsken i ulik grad. Uten detaljerte målinger eller beregninger for den enkelte propell er det nødvendig å tilpasse rotasjonshastigheten til det aktuelle strømningssituasjonen. Basert på målinger for hastighetene ved flere posisjoner i MD ble disse brukt til å bestemme en rotasjonshastighet for væsken ut fra strømsetterne. Måldata fra 100% trust i 2023 ble sammenlignet med simuleringsdata med ulike verdier for væskens rotasjonshastighet ut fra strømsetterne. En verdi for væskens rotasjon ga god overensstemmelse for gjennomsnittshastigheten fra simuleringen og måldataene. Denne rotasjonshastigheten ble beholdt til måleserien med samme skyvekraft i desember 2024.

For 60% skyvekraft fant vi hvor mange % propellens rotasjonshastighet var redusert med. For simulering av måleseriene med 60% skyvekraft ble væskerotasjonen fra strømsetterne også redusert med tilsvarende %.

3.3.5 Utløp

Senterutløpet i CFD-beregningen er modellert som et trykkutløp.

Utskiftningsraten gjennom hovedutløpet er mye større enn utstrømningen gjennom slamfellene. Det er derfor valgt å se bort fra utløp til slamfeller og dødfisk-luker i de oppdaterte beregningene. Alt vannet har utløp til senter gjennom luker i «innerveggen».



4 SAMSVAR MÅLINGER VS. CFD

4.1 Resultater – 2023

4.1.1 100% modus for strømsettere

Forholdet mellom den gjennomsnittlige hastigheten langs donuten beregnet og målt i de 27 punktene var 0.92. De beregnede hastighetene langs donuten i målepunktene var innenfor $\pm 20\%$ av målt verdi i 14 av punktene, og innenfor $\pm 40\%$ i 9 av punktene. I de resterende 4 punktene var det kun 1 punkt som avvek mer enn 50% fra målingene. Forholdet mellom beregnet og målt verdi er vist i Tabell 1.

Tabell 1: Forholdet mellom beregnet og målt x-hastighet for 100% modus (beregnet/målt). Fargeskalaen er gradert fra minste (rød) til største (grønn) forhold mellom beregnet og målt x-hastighet.

		X1	X2	X3
Luke 3	Y1	99%	127%	57%
	Y2	125%	100%	80%
	Y3	107%	67%	66%
Luke 6	Y1	135%	109%	90%
	Y2	149%	99%	69%
	Y3	160%	112%	64%
Luke 14	Y1	107%	92%	82%
	Y2	137%	96%	80%
	Y3	89%	63%	59%

4.1.2 60% modus for strømsettere

Til 60% caset ble hastighetene inn og ut av strømsetterne redusert som beskrevet i kapittel 3.3.3.

Forholdet mellom den gjennomsnittlige hastigheten langs donuten beregnet og målt i de 27 punktene var 1.02. Resultatet ble at de beregnede hastighetene langs donuten i målepunktene var innenfor $\pm 20\%$ av målt verdi i 18 punkt, og innenfor $\pm 40\%$ i 6 punkt. De siste 3 punktene avvek maksimalt 51% fra den målte verdien. Forholdet mellom beregnet og målt verdi er vist i Tabell 2.



Tabell 2: Forholdet mellom beregnet og målt x-hastighet for 60% modus (beregnet/målt). Fargeskalaen er gradert fra minste (rød) til største (grønn) forhold mellom beregnet og målt x-hastighet.

		X1	X2	X3
Luke 3	Y1	113%	81%	102%
	Y2	107%	118%	120%
	Y3	105%	76%	86%
Luke 6	Y1	124%	129%	98%
	Y2	151%	83%	63%
	Y3	151%	144%	84%
Luke 14	Y1	129%	94%	80%
	Y2	106%	107%	81%
	Y3	92%	91%	86%

4.2 Resultater – 2024

4.2.1 100% modus for strømsettere

For 100% modus ble hastighetene inn og ut av strømsetterne satt identisk med hastighetene for 100% modus med original plassering av strømsetterne. Strømsetterne var senket 1200 mm.

De beregnede hastighetene langs donuten i målepunktene var innenfor $\pm 20\%$ i 9 av målepunktene, og innenfor $\pm 40\%$ i 12 punkt. De siste 5 punktene avvek opptil 50% fra den målte verdien. Forholdet mellom beregnet og målt verdi er vist i Tabell 3.

Tabell 3: Forholdet mellom beregnet og målt x-hastighet for 100% modus (beregnet/målt). Fargeskalaen er gradert fra minste (rød) til største (grønn) forhold mellom beregnet og målt x-hastighet.

		X1	X2	X3
Luke 3	Y1	130%	127%	89%
	Y2	113%	71%	75%
	Y3	150%	86%	64%
Luke 6	Y1	141%	120%	101%
	Y2	150%	102%	79%
	Y3	150%	135%	77%
Luke 14	Y1	105%	99%	94%
	Y2	140%	114%	80%
	Y3		134%	80%

4.2.2 60% modus for strømsettere

Til 60% caset ble hastighetene inn og ut av strømsetterne redusert som beskrevet i kapittel 3.3.3.

De beregnede hastighetene langs donuten i målepunktene var innenfor $\pm 20\%$ i 16 av målepunktene, og innenfor $\pm 40\%$ i 6 punkt. De siste 4 punktene avvek opptil 57% fra den målte



verdien med unntak av punkt Y1-X3 der beregnet verdi var 93% høyere enn målt. Forholdet mellom beregnet og målt verdi er vist i Tabell 4. Det mangler målt verdi i luke 3 posisjon Y1-X3.

Tabell 4: Forholdet mellom beregnet og målt x-hastighet for 60% modus (beregnet/målt). Fargeskalaen er gradert fra minste (rød) til største (grønn) forhold mellom beregnet og målt x-hastighet.

		X1	X2	X3
Luke 3	Y1	86%	91%	193%
	Y2	145%	79%	157%
	Y3		83%	102%
Luke 6	Y1	118%	111%	148%
	Y2	117%	120%	93%
	Y3	119%	134%	113%
Luke 14	Y1	102%	111%	132%
	Y2	114%	88%	136%
	Y3	121%	87%	130%

4.3 Usikkerhetsmomenter ifm. sammenligning CFD vs. målinger

Konturplottene fra CFD viser at det er lokalt store hastighetsforskjeller i de tre planene som representerer plasseringen av hastighetsmålerne. Relativt små endringer i plassering av monitoreringspunktene kan resultere i at verdiene som sammenlignes med målingene endres betydelig.

Eksempelvis ser vi nedstrøms strømsetter en betydelig forhøyet hastighet; et direkte resultat av strømmingen ut fra strømsetterne. En mindre endring i retningen vil flytte posisjonen av den høye hastigheten. Derfor vil små forskjeller mellom modellert og faktisk geometri, f.eks. en rotasjon av strømsetttertårnet, ha betydning for detaljer i resultatene.

Om vi ser på luke 14, så er denne plassert oppstrøms en strømsetter, og derfor mindre påvirket av denne. Dette gir utslag i mindre variasjon i de beregnede hastighetene og bedre samsvar sammenlignet med de andre lukene.

4.4 Rasjonale for CFD

Når det er slik usikkerhet knyttet til betingelser som styrer resultatene kan vi ikke forvente å få løsninger som stemmer overens med målingene. Vi vet, fra erfaring, at vi likevel kan studere de relative forskjellene i ulike beregningscase, f.eks. med ulike innløpshastigheter. Endringene som funksjon av ulike betingelser beskriver tendensene som kan forventes.



5 SAMSVAR MED OG UTEN BIOMASSE

Når det er biomasse (fisk) til stede i Marine Donut vil strømningsmønsteret påvirkes. Fiskens svømmebevegelser vil påvirke strømmingen i domenet.

Aqua Kompetanse AS målte strømningshastigheter med [2] og uten fisk [3] i Marine Donut ved ellers like betingelser. Strømningsratene inn/ut av donut var like, og strømsetterkapasiteten var lik. Målingene ble gjort ved to ulike strømsetterkapasiteter, 60% og 100%. Uten fisk til stede ble den målte gjennomsnittshastigheten i hovedstrømretning redusert til 69% når strømsetterkapasiteten ble redusert til 60%.

Målt hastighet langs donutens hovedstrømningsretning med fisk til stede er lavere enn uten fisk. Gjennomsnittlig hastighet med fisk var 87% for 100% strømsetterkapasitet og 70% av hastigheten uten fisk for 60% strømsetterkapasitet. Se detaljer i henholdsvis Tabell 5 og Tabell 6.

Tabell 5: Forholdet mellom hastighet med og uten fisk ved 100% strømsetterkapasitet. Fargene indikerer avstand fra gjennomsnittlig hastighetsforskjell (87%).

	X1	X2	X3
Luke 3	100%	75%	61%
	106%	93%	47%
	98%	67%	81%
Luke 6	102%	74%	71%
	102%	109%	87%
	120%	89%	71%
Luke 14	75%	70%	66%
	113%	109%	70%
		133%	76%

Tabell 6: Forholdet mellom hastighet med og uten fisk ved 60% strømsetterkapasitet. Fargene indikerer avstand fra gjennomsnittlig hastighetsforskjell (70%).

	X1	X2	X3
Luke 3	69%	54%	64%
	75%	76%	69%
		88%	59%
Luke 6	84%	65%	56%
	94%	95%	55%
		72%	72%
Luke 14	78%	73%	56%
	55%	60%	85%
	79%	64%	55%



6 LÆRINGSUTBYTTE

Gjennom arbeidet med å simulere strømningsforholdene i Marine Donut har vi gjort mange erfaringer, og økt vår kunnskap innenfor flere områder. Vi vil spesielt trekke fram disse erfaringene:

- Modelleringen av strømsetterne må forenkles. Det er ikke mulig å inkludere nøyaktig geometri. Ved en slik forenkling er det viktig å plassere strømsetterne ved riktig posisjon.
- Strømningen ut fra strømsetterne bør inkludere rotasjonskomponenten av vannet. Når vannet roterer ut fra strømsetterne vil den turbulente dissipasjonen øke, og hastigheten i hovedstrømretningen reduseres. Vi har sett at resultatene stemmer bedre overens med de målte hastighetene når rotasjonen inkluderes.
- Valg av turbulensmodell påvirker dissipasjonen, og dermed i noen grad reduksjonen av hastighet i mantelen. Ulike modeller kan testes for å vurdere forskjellene. Vi har stort sett brukt $k - \epsilon$ - modellen med koeffisientene til «*Realizable*»-varianten. SST $k - \omega$ - modellen er også en mulig modell.
- Større geometriske detaljer, som strømsetttertårnene, bør inkluderes siden de påvirker strømningen lokalt ved at den avbøyes rundt elementene. Disse elementene gir også motstand mot strømningen, og bør derfor inkluderes for å få med effekten.
- Mindre geometriske detaljer kan utelates. Ved usikkerhet kan det gjennomføres sensitivitetsanalyser for å vurdere effekten av elementer.
- En vurdering av gridsensitivitet bør også gjennomføres slik at man vet at løsningen ikke er påvirket av et for grovmasket beregningsmesh.

Målinger utført på Marine Donut innehar også store usikkerheter. Det handler om nøyaktig plassering av måler, hvorvidt den er korrekt rotert ift. hovedstrømningsretning, fastholdt over tid, etc.

Når man søker samsvar mellom beregninger og målinger finner man avvik, og særlig i områder sterkt påvirket av strømsetterne, og hvor hastighetsfeltet varierer i større grad. Likevel er det viktig å påpeke hvordan beregninger (CFD) kan bistå med å studere relative forskjeller i en designfase.

Måleseriene med og uten biomasse viser at gjennomsnittshastigheten i hovedstrømretningen reduseres når det er fisk i Marine Donut. Denne usikkerheten er imidlertid mindre enn variasjonen funnet når man sammenligner hastighetsmålinger og beregninger for punkter i hastighetsfeltet.



7 REFERANSER

- [1] Strømmålingsforsøk desember 2023, Aqua Kompetanse AS, Hege G, Frøysa, 15.01.2024, 2879-12-23N Seterneset.pdf.
- [2] Strømmålingsforsøk september 2024, Aqua Kompetanse AS, Hege G, Frøysa, 18.10.2024, 2879-9-24N Seterneset.pdf.
- [3] Strømmålingsforsøk desember 2024, Aqua Kompetanse AS, Hege G, Frøysa, oppdatert 28.02.2025, 2879-12-24N V2 Seterneset.pdf
- [4] Bluegreen Group web page (09.02.2024); Utklipp fra Marine Donut demonstrasjonsvideo; <https://bluegreengroup.no/en/services/marine-donut>
- [5] Kommunikasjon med Steingrim Holm, SalMar AS.
- [6] Kommunikasjon med Hege G, Frøysa, Aqua Kompetanse AS.
- [7] Kommunikasjon med Geir Andresen, Bluegreen Fusion AS.



Appendix A

About Ranold AS



Ranold AS

Since 2006 Ranold AS, formerly known as Acona Flow Technology, has built a unique expert team within flow modelling and simulations services. This group has the capability and the ambition to contribute to increased operational safety, minimization of risks and increased profitability for its clients

Ranold AS has the mission to:

- Deliver best-in-class services within blowout modelling and well control
- Provide simulation services based on state-of-the-art tools and models
- Offer in-depth understanding and analytical approach to complex flow phenomena
- Serve various industries worldwide, and transfer know-how across industries
- Attract world-class specialists and enthusiastic talents through outstanding reputation

Ranold provides simulations and advisory services to the oil and gas industry within the following areas:

Blowout contingency planning

- Risk management and contingency documentation through advanced simulations and operational insight
- Simulation services, advisory services, risk management and peer review services

Wellkill planning and well control advice

- Transient kill simulations as mandatory documentation of kill capability and to assist well engineering teams

Emergency response teams

- Trained and IWCF certified teams available to assist planning, preparation and execution of wellkill operations worldwide

Flow assurance teams

- Skilled seniors with long industrial training available for detailed flow assurance studies related to well and flowline hydraulics, thermal performance, production chemistry or metallurgy
- Complete design-basis engineering studies can be delivered

Computational Fluid Dynamics

- Advanced CFD experts are available for in-depth analysis of process related flow phenomena and their interaction with structure
- Wind, gas, explosion, spill, separation, settling, erosion, insulation, combustion and radiation are some of many areas to be covered with CFD



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

