

EXPOSED

AQUACULTURE OPERATIONS
CENTRE FOR RESEARCH-BASED INNOVATION

EXPOSED-katalogen
Versjon 9.3.2023

EXPOSED-katalogen

SFI EXPOSED Aquaculture Operations var et senter for forskningsbasert innovasjon i 2015-2023. Mer om senteret på side 6.

EXPOSED-katalogen er en samling av kunnskap fra SFI EXPOSED. Her finnes det informasjon om senteret, forskningsområdene, prosjektene, PhD- og postdoc-arbeidet, og oversikt over resultater. Se innholdsfortegnelse neste side.

Denne katalogen ble opprinnelig lagd som et internt, levende dokument som ble kontinuerlig oppdatert med resultater og relevant informasjon for senteret. Nå er konfidensiell informasjon fjernet, for å gjøre forskningskunnskapen tilgjengelig for allmennheten. Hvert prosjekt ble beskrevet underveis, slik at noe av kunnskapen står beskrevet i nåtid, selv om det kan ha skjedd annen utvikling senere.

Katalogen er laget for lesing på skjerm, med lenker til sider internt i dokumentet og internettkilder.

Innholdet i EXPOSED-katalogen er sortert etter tema eller forskningsområde. Hvilket tema/forskningsområde man befinner seg i kan leses på høyre side og er fargekodet. Mye av arbeidet er tverrfaglig, men sorteres under det temaet/forskningsområdet som er hovedfokuset.

For endringer og spørsmål angående EXPOSED-katalogen, ta kontakt med leder for SFI EXPOSED, [Hans Bjelland](#) i SINTEF Ocean.

Navigasjon i katalogen:

EXPOSED-katalogen kan navigeres som et vanlig pdf-dokument, ved å skrolle gjennom sidene. I tillegg finnes det tre typer lenker.

1. Navigasjonspanel øverst til høyre: Sekskanten fører til innholdsfortegnelsen. Piltastene over og under navigerer til forrige eller neste siden.

2. Temaområde: Enkelte sider vil også inneholde sekskanter med tema/forskningsområde. Et klikk på en slik figur vil forflytte en til det aktuelle temaet/forskningsområdet.

3. Understreket tekst: Understreket tekst fører enten til en side inne i EXPOSED-katalogen, dokument i e-rommet eller en ekstern side.

Andre lenker, slik som bildelenker, skal være tydelig markert.



Innholdsfortegnelse [1/2]

Eksponerte havbruksoperasjoner

SFI Konsortiet

SFI Årsrapporter

PhD med finansiell støtte fra senteret [1/2]

PhD med finansiell støtte fra senteret [2/2]

PhD på prosjekter med finansiell støtte fra andre finansieringskilder

Postdoc med finansiell støtte fra senteret

Postdoc på prosjekter med finansiell støtte fra andre finansieringskilder

P1 Fremtidige konsepter

P9 Fremtidige scenarioer

P10 Standardisering og regulering

Verdiskapningsanalysen

P19 Samlet analyse av resultater og effekter fra SFI EXPOSED

Forskningsområde 1 – Autonome systemer og teknologier for fjernoperasjoner

Fo1 Aktiviteter 2022

Fo1 Resultatoversikt

PhD Autonom teknologi for IMR-operasjoner i havbruk

PhD Navigasjon av undervannsfarkost relativt til merd

PhD Modellering og kontroll av undervanns-fartøy-manipulator-systemer innen oppdrettsnæringen

PhD Kontaktfrie operasjoner i havbruk med Reinforcement Learning

P2 Multioperasjons robotsystem for inspeksjon og intervensjon i merd

P14 DEMO Kontaktfri operasjon ved bruk av robotarm ombord i fartøy

Forskningsområde 2 – Overvåking og beslutningsstøtte av fisk, anlegg og operasjoner

Fo2 Aktiviteter 2022

Fo2 Resultatoversikt

PhD Utnytting av datainnsamling for å støtte operasjoner på eksponerte havbruksinstallasjoner

Postdoc Utnytting av datainnsamling for å støtte operasjoner på eksponerte havbruksinstallasjoner

PhD Gjenkjenning av miljøbetingede adferdsmønstre med dyp læring

PhD Teknologiske løsninger for sanntidsobservasjon av fysiologi- og adferdsdynamikk hos oppdrettsfisk

P6 Systemer for beslutningsstøtte

P8/P18 e-Infrastruktur

P18 Måledata fra bøyer, fartøy og flåter

P12 DEMO Tilstandsestimering og operasjonsplanlegging i sanntid

Fo2 Måledata fra bøyer – sammenlikning

Fo2 Digital tvilling av eksponert havbruksanlegg

P13 DEMO Operasjonsplanlegging

Forskningsområde 3 – Konstruksjoner for eksponerte lokaliteter

Fo3 Aktiviteter 2022

Fo3 Resultatoversikt

PhD Strukturell design av eksponerte havbrukskonstruksjoner

PhD Lukkede oppdrettsanlegg i bølger og strøm

PhD Metode for sanntid hybridmodelltesting av marine konstruksjoner

PhD Avansert og rasjonell analyse av oppdrettsanlegg i stål for eksponerte farvann

P7 Pålitelige konstruksjoner

P15 Strukturell analyse av oppdrettsanlegg

Fo3 Konstruksjoner for eksponerte lokaliteter

Fo3 Lastmodell og soliditet til not

Fo3 Krefter på not – numerisk modellering



Innholdsfortegnelse [2/2]

Forskningsområde 4 – Fartøysdesign for eksponerte operasjoner

Fo4 Aktiviteter 2022

Fo4 Resultatoversikt

PhD Metoder og modeller for prosjektering av fartøy og fartøysoperasjoner i eksponert havbruk

PhD Begrensende operasjonelle forhold for brønnbåter

P3 Fartøy-struktur interaksjon

P17 MS Exposed – Servicefartøy for eksponerte havbruksoperasjoner

Forskningsområde 5 – Sikkerhet og risikostyring i havbruksoperasjoner

Fo5 Aktiviteter 2022

Fo5 Resultatoversikt

Postdoc Reduksjon av risiko i havbruk - Operasjonelle grenser i et risikoperspektiv

PhD Sikkerhet og risikostyring i eksponerte havbruksoperasjoner

P4 Sikkerhet i havbruksoperasjoner

Fo5 Flåte

Fo5 Beredskap

Fo5 Operasjonsgrenser og risikofaktorer

Fo5 Veileder for beredskap

Fo5 Helhetlig risikostyring og avlusning som case

Forskningsområde 6 – Fiskeadferd og velferd ved mer eksponert oppdrett

Fo6 Aktiviteter 2022

Fo6 Resultatoversikt

PhD Dyrevelferd i eksponert akvakultur

PhD Akustisk fisketeleometri på fisk for sanntidsovervåkning i akvakultur

PhD Strømningsdynamikk og turbulens i stor-skala oppdrettsmerder

Postdoc Laks og surfing - adferd og velferd til oppdrettslaks på eksponerte lokaliteter

P5/16 Fiskebiologi i eksponert havbruk

Fo6 Laksens hjerterate som velferdsindikator

Fo6 Laksen faster uten problemer

Fo6 Hjerterate-tagger er nyttige

Fo6 Laksen er fantastisk utholdende!

Fo6 Test av haleslags-tag i laks

Fo6 Analyse av global merdteknologi

Fo6 Laksen unngår bølger



Eksponeerte havbruksoperasjoner



SFI EXPOSED Aquaculture Operations

EXPOSED har vært et senter for forskningsdrevet innovasjon (SFI) i åra 2015-2023. Senteret har utviklet kunnskap og teknologi for robust, sikkert og effektivt fiskeoppdrett på eksponerte lokaliteter.

Betydelige deler av norske farvann har vært utilgjengelig for industrielt fiskeoppdrett fordi de er avsidesliggende og har krevende vind-, bølge- og strømforhold. EXPOSED-senteret har utnytta Norges sterke posisjon og kunnskap innen maritime sektorer, slik som havbruk og offshore, for å muliggjøre sikker og bærekraftig sjømatproduksjon i utsatte kyst- og havområder. Teknisk utvikling og kunnskap om f.eks. autonome systemer, offshorekonstruksjoner og -fartøy er nødvendig for å opprettholde produksjon under alle forhold og muliggjøre mer robuste, sikre og kontrollerte operasjoner.

Senterets fokus har gitt kompetanse og løsninger som tjener både eksponert og mer skjermet produksjon. Den nye kunnskapen fra eksponert havbruk er

også tatt i bruk i andre maritime produkter og tjenester.

EXPOSED-senteret er finansiert av Norges forskningsråd.

Senteret har bestått av seks forskningsområder: Autonomi, Overvåkning, Konstruksjoner, Fartøy, Sikkerhet og Fisk.

De fire første områdene har handlet om teknologiske innovasjoner for sikre og pålitelige havbruksoperasjoner. De to siste forskningsområdene har fokusert på sentrale forutsetninger for bærekraftig drift.



Autonomi

Autonome systemer og teknologier for fjerndrift av operasjoner

Overvåkning

Overvåkning og beslutningsstøtte av fisk, anlegg og operasjoner



Konstruksjoner

Konstruksjoner for eksponerte lokaliteter



Fartøy

Fartøysdesign for eksponerte operasjoner



Sikkerhet

Sikkerhet og risikostyring for menneske og anlegg



Fisk

Fiskeadferd og -velferd ved mer eksponert oppdrett

SFI Konsortiet

EXPOSED forener globalt ledende oppdrettere, sentrale service- og teknologileverandører, og fremtredende forskningspartnere. Senteret var organisert med en senterdirektør, et styre på sju medlemmer fra senterpartnerne, og forskningsområdeledere for hvert forskningsområde.

Senterdirektør: [Hans V. Bjelland](#)

Trykk på logo for å komme til partnerens hjemmeside.



KONGSBERG



SFI EXPOSED – Årsrapporter



Trykk på bildene for å lese årsrapportene.

PhD med finansiell støtte fra senteret



Strukturell design av eksponerte havbruksoperasjoner



Dyrevelferd i eksponert akvakultur



Autonom teknologi for IMR operasjoner i havbruk



Utnyttning av datainnsamling for å støtte operasjoner på eksponerte havbruksinstallasjoner



Sikkerhet i eksponerte havbruksoperasjoner – Strategier og metoder for å redusere risiko



Akustisk telemetri på fisk for sanntids-overvåkning i akvakultur

PhD med finansiell støtte fra senteret



FISH

Gjenkjenning av miljø-
betingede adferdsmønstre
med dyp læring



STRUCTURES

Lukkede
oppdrettsanlegg i
bølger og strøm



AUTONOMY

Kontaktfrie operasjoner i
havbruk med
Reinforcement Learning



VESSELS

MONITORING

Fartøysoperasjoner i
eksponert havbruk



STRUCTURES

Avansert og rasjonell
analyse av
oppdrettsanlegg i stål
for eksponerte farvann

PhD på prosjekter med finansiell støtte fra andre finansieringskilder



VESSELS

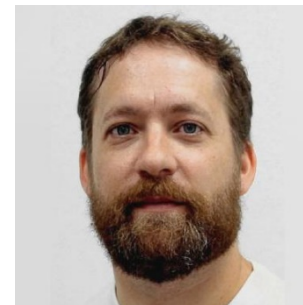
STRUCTURES

Begrensende operasjonelle forhold for brønnbåt



AUTONOMY

Navigasjon av undervannsfarkost relativ til merd



FISH

Teknologiske løsninger for sanntidsobservasjon av fysiologi- og adferdsdynamikk hos oppdrettsfisk



STRUCTURES

Metode for sanntid hybridmodelltesting av marine konstruksjoner



FISH

Strømningsdynamikk og turbulens i stor-skala oppdrettsmerder



AUTONOMY

Modellering og kontroll av undervannsfartøymanipulator-systemer innen oppdrettsnæringen

Postdoc med finansiell støtte fra senteret



FISH

Laks og surfing – adferd og velferd av oppdrettslaks på eksponerte lokaliteter



Utnytting av datainnsamling for å støtte operasjoner på eksponerte havbruksinstallasjoner



FISH

Dyrevelferd i eksponert akvakultur

Postdoc med støtte fra andre finansieringskilder



SAFETY

Reduksjon av risiko i havbruk
-Operasjonsgrenser i et
risikoperspektiv

P1 Fremtidige konsepter



PROSJEKTLEDER

Hans V. Bjelland (SINTEF Ocean)

PARTNERE INVOLVERT

Alle

PERIODE

Q2 2015 – Q2 2016

TYPE FORSKNING

Grunnleggende

Prosjektet vurderte muligheter for eksponerte operasjoner i havbruksnæringen, og operasjonelle elementer relatert til automasjon, HMS, båtdesign, konstruksjon og biologiske perspektiver. Resultatene var ment som et grunnlag for videre forskning og samarbeid i SFI EXPOSED, men har blitt brukt langt ut over dette.

Prosjektet *fremtidige konsepter* utforsket mulighetsområdet for eksponert havbruk og fremtidige konsepter for eksponert havbruk. Prosjektet hadde også som mål at hver partner skulle få gi tilbakemeldinger på senterets planer, diskutere hver partners ambisjoner, ønsker og bidrag. Prosjektet hadde to hovedleveranser, en intern rapport om fremtidige konsepter og en patentlandskapsanalyse.

Alle forskningsområdene bidro til rapporten "Future Concepts" som dokumenterte state-of-the-art-kunnskapen og diskuterer innovasjonspotensialet til lakseoppdrett i mer eksponerte områder. Eksponeringsnivået

til konvensjonelle nåtidige oppdrettsanlegg ble studert. Hvert forskningsområde evaluerte også mulige teknologier og strategier for eksponert havbruk.

Patentlandskapsanalysen ble laget gjennom et samarbeid mellom Patentstyret og Norges forskningsråd. Analysen vurderte eksisterende patentdata innenfor marin akvakultur og fiskeoppdrett.



Resultater:

- Rapport om fremtidige konsepter (intern), tilgjengeliggjøres i oppsummerende rapport i 2023.
- Patentlandskapsanalyse

Innovasjonspotensiale:

- Støtte til patentsøknader

← Rapportene



← Rapporten

Patentlandskapsanalyse

Analysen besto av et patentdatasett med forskningsområdene 1-4 som undergrupper. Innenfor autonomi, overvåking og fartøysdesign er det få norske patentsøknader. Det forventes å bli viktig å søke patenter for å sikre handlefrihet i fremtiden.

Selv om Norge holder en sterk internasjonal posisjon innenfor akvakultur, kan den norske fiskeoppdrettsindustrien i fremtiden møte stor konkurranse fra land som Kina, USA, Japan og Sør-Korea, både nasjonalt og internasjonalt.

I 2015 hadde Kina fem ganger så mange søknader som resten av verden sammenlagt. De fleste av søknadene er registrering av bruksmønster, som ikke tilbys i Norge. Denne beskyttelsesform stiller vanligvis lavere krav til oppfinnerhøyde, beskyttelsestiden er kortere og hovedinteressene har vært innlands. Kinesiske myndigheter støtter sterkt økning av kvalitet og internasjonalisering av patenter.

Med tanke på utstyr og operasjoner bør man følge med på konkurrenter i USA, Storbritannia, Frankrike, Sverige og Japan. Herfra kommer mange patenter

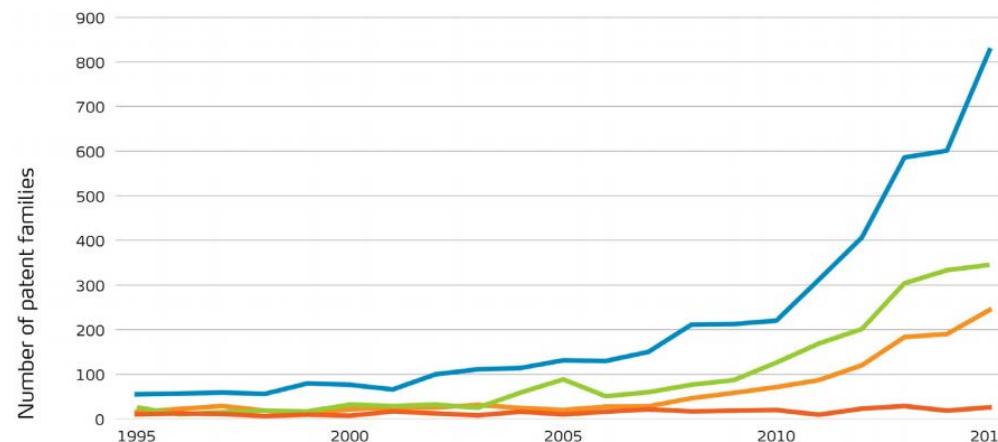
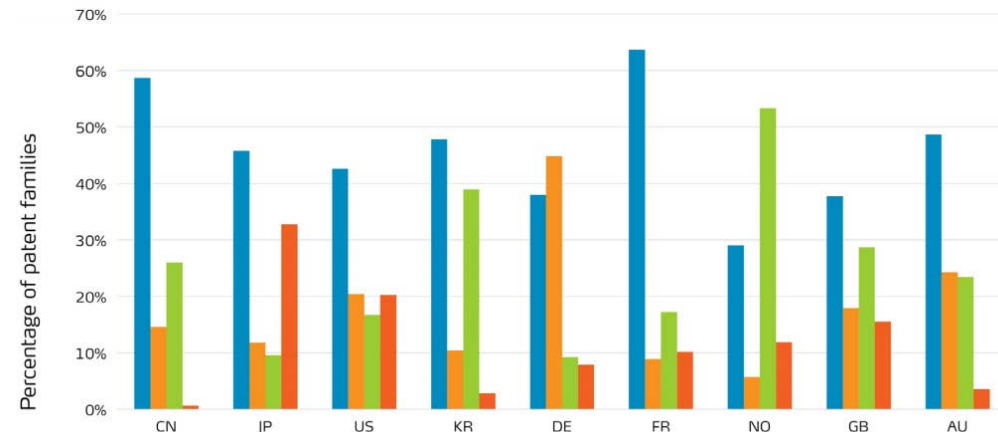
som også gjelder i Norge og som kan hindre handlefrihet.

Norske patentsøknader var hovedsakelig knyttet til konstruksjoner. Norge har flest etter Sør-Korea, som har hatt stor økning de siste årene. Dette kan være en indikasjon på at norsk industri vil møte økt konkurranse fra Sør-Korea, tilsvarende skipsfarts- og oljeindustrien.

Sammenlignet med Japan, Korea og USA har Norge få patentsøknader innen automatisering. Firmaer innen dette fagfeltet bør derfor være spesielt oppmerksomme på sin handlefrihet, og at de ikke gjør inngrep på andres rettigheter.

Norske patenter dekker ofte kun 1-4 land, og beskytter da gjerne ikke i land som Chile, Indonesia, Filippinene og Russland.

■ Area 1 ■ Area 2 ■ Area 3 ■ Area 4



P9 Fremtidige scenarier



PROSJEKTLEDER	PARTNERE INVOLVERT	PERIODE	TYPE FORSKNING
Hans V. Bjelland (SINTEF Ocean)	Alle	Q1 2017 – Q2 2017	Grunnleggende

Formålet med dette prosjektet var å utforske scenariometodikk og den norske havbruksindustriens utvikling frem mot 2050. Arbeidet ble gjort i et masterprosjekt som gjennom flere tilnærminger utviklet fire scenarier for en mulig fremtidig næring. Scenariene kan videre benyttes av beslutningstakere for å forberede seg på mulige trusler og muligheter.

Analysen baserer seg på en studie av havbruksindustriens situasjon i dag, dens utvikling, dens 2050-mål, forutsetningene for å nå 2050-målene, en PESTEL-analyse, en konkurransekraft-analyse og en SWOT-analyse. Videre, for å sikre nødvendig informasjon for å gjennomføre analysen har seks intervjuer med syv relevante interessenter til industrien blitt gjennomført.

Hovedresultatene av denne oppgaven er fire scenarier med navn *Dry Well*, *Puddle*, *Ocean* og *Poseidon* som alle beskriver mulige fremtidige situasjoner for industrien i 2050 og utviklingen som har ledet opp til denne.

For hvert scenario er det laget en korresponderende handlingsplan. Hensikten med disse er å beskrive implikasjonene av scenarioene med tanke på avgjørelser og strategiske interesser, avgjøre om informasjonen om fremtiden validerer de originale antakelsene, avgjøre hva

scenarioene antyder for designet og timingen av strategier, beskrive hvilke trusler og muligheter scenarioene foreslår, beskrive hvilke kritiske problemer som fremkommer i scenarioene, avgjøre hvilke saker som bør bli adressert av spesifikke beredskapsplaner, avgjøre hvilken type fleksibilitet og motstandsdyktighet som er nødvendig fra industriens planleggingsperspektiv og avgjøre hvilke faktorer som bør overvåkes. En fellesnevner i handlingsplanene er at miljømessig bærekraft burde ha høyere prioritet dersom industrien skal oppnå 2050-målene. En annen fellesnevner er at miljøproblemene hemmer industriens vekst i alle scenarioene hvor industrien ikke oppnår 2050-målene. Derfor foreslår alle handlingsplanene at miljøproblemene burde bli adressert av spesifikke beredskapsplaner.

Resultater:

- Masteroppgave: Finne, W. (2017). [Norwegian Aquaculture 2050: A Scenario Planning Analysis](#).

Innovasjonspotensiale:

- Støtte til strategiske beslutninger

P10 Standardisering og regulering



PROSJEKTLEDER

Hans V. Bjelland (SINTEF Ocean)

PARTNERE INVOLVERT

Alle

PERIODE

Q1 2017 – Q4 2017

TYPE FORSKNING

Grunnleggende

Regulering og standardisering er en viktig ramme for dagens og fremtidens havbruksnæring. Utfordringer med drift på eksponerte lokaliteter og nye anleggskonsepter tydeliggjør behov for kunnskap og tilpasninger.

Med vekt på betydningen av eksponerte utfordringer, har dette prosjektet kartlagt relevant regulering og standardisering. Prosjektet har:

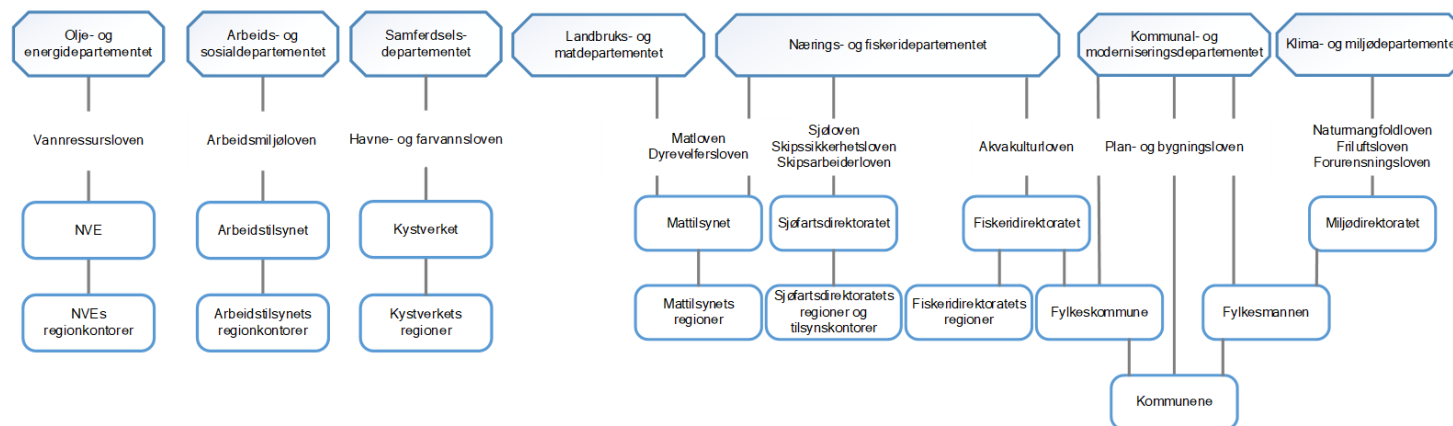
- Identifisert hvordan de ulike områdene og prosjektene i EXPOSED kan bidra til revisjoner og hensiktsmessige rammer for næringen
- Skapt en plattform for dialog blant EXPOSED-partnere, myndigheter og andre stakeholdere, blant annet gjennom felles møter og seminar
- Koordinert aktiviteter blant

ulike prosjekter for å nå disse målene.

De følgende områdene er foreløpig identifisert:

- Fôrflåter og behandlingslektere
- Prosedyrer for interaksjon mellom fartøy og not og merd
- Miljøanalyser får økt betydning for planlegging av anlegg og drift
 - Metoder for å fastslå dimensjonerende tilstander
 - Analysemetoder for anlegg og operasjoner
 - Forutsigbare og

- konsistente miljøanalyser
- Analyse og dokumentasjon av ny teknologi og innvirkning på operasjonell sikkerhet, risiko for rømming og fiskehelse
- Kompetansebehov
- Etablering av metoder for operasjonelle grenser for risikostyring



Resultater:

- EXPOSED-dag oktober 2017
- Bidrag til revisjon av NS 9415
- DNVs class rules for classification of offshore fish farming units/installations (DNV-RU-OU-0503)

Innovasjonspotensiale:

- Hensiktsmessige rammevilkår
- Hensiktsmessige bransjestandarder

Verdiskapningssanalysen – Verdiskapningspotensiale og veikart for havbruk til havs: Hovedrapport

Partnere i senteret har bidratt i arbeidet med verdiskapningsanalysen. Oppdragsgiver for rapporten er Stiim Aqua Cluster i samarbeid med Norsk Industri, DNB, Stavanger kommune, Rogaland fylkeskommune og Greater Stavanger.

Rapporten gir estimater av verdiskapningspotensialet for havbruk til havs gjennom kvalitative og kvantitative analyser av muligheter og utfordringer for tilbuds- og etterspørselssiden i det globale laksemarkedet. Dette omfatter ulike produksjonssystemer i oppdrett fra landbasert via konvensjonelt innaskjærs til offshore havbruk. Analysene omfatter også mulige utviklingsbaner for global etterspørsel.

Rapporten har et verdikjedeperspektiv, fordi offshore havbruk vil være avhengig av en

verdikjede fra landbasert smoltproduksjon til sluttmarkeder.

I rapporten brukes scenarier til å si noe om potensialet for nye arbeidsplasser i verdikjeden for havbruk.



← Rapporten

P19 Samlet analyse av resultater og effekter fra SFI EXPOSED



PROSJEKTLEDER	PARTNERE INVOLVERT	PERIODE	TYPE FORSKNING
Kristine Vedal Størkersen (SINTEF Ocean)	Alle	2022–2023	Grunnleggende

Utfordringer

SFI EXPOSED har siden 2015 utviklet teknologi og kunnskap for robuste, sikre og effektive operasjoner på eksponerte lokaliteter. Resultatene har påvirket oppdretterne og organisasjonene som er med i senteret. Effektene av kunnskapen og teknologien strekker seg også langt utover EXPOSED-partnerne, og kan bidra til løse samfunnets utfordringer. Tidlig i senterperioden ble EXPOSED-senterets resultater nyttiggjort enkeltvis, mens vi med dette prosjektet har sett på resultatene samla og satt dem inn i en samfunnskontekst. Det siste året av senterperioden har vi dermed bidratt til å synliggjøre hvordan eksponert oppdrett kan bidra til å løse samfunnsutfordringene. Effektene av EXPOSED er summen av alle resultatene og hvordan disse kan fortsette å bli brukt fremover.

Forskningsoppgaver

[Samlet analyse av forskningsområdenes bidrag til måloppnåelse i SFI EXPOSED](#): Felles analyse av resultatene i alle forskningsområdene. Hva er status for eksponert oppdrett i dag – forskning, drift/konsepter og rammevilkår?

[Innhenting av data fra relevante aktører](#): Intervju av og arbeidsmøter med deltakere i SFI EXPOSED og andre aktører, som forvaltning, interesseorganisasjoner, og andre selskap.

Felles formidling av resultater og effekter fra SFI

EXPOSED: Arbeid med ulike måter å formidle resultatene og få effekter av SFI EXPOSED.

Noen av resultatene:

- [Oppdatert nettside](#)
- [Populærvitenskapelig formidling](#)
- Rapport om SFI-ordninga (utgis andre kvartal 2023)
- Rapport om [FoU-behov for havbruk til havs](#)
- Denne EXPOSED-katalogen
- [EXPOSED-konferansen, avslutningskonferanse i 2023](#)
- Vitenskapelig rapport og artikkel om resultatene (ventes)
- Samla presentasjon av senteret og de viktigste funn (til partnere)
- "Smart forklart", podkast i april 2023





Forskningsområde 1 – Autonome systemer og teknologier for fjernoperasjoner

Autonome systemer og teknologier for fjernoperasjoner

Utfordringer

Utvikle verktøy og plattformer for robust autonom og fjernstyrt drift av daglig rutinearbeid og periodiske operasjoner for å redusere behovet for direkte menneskelig interaksjon med produksjonsprosessen.

Forskningsoppgaver

Fjernstyrte inspeksjons- og reparasjonssystemer: Viktige forskningsfelt i denne sammenheng er: 1) Guidance, Navigation and Control (GNC)-systemer, bruk av maskinsyn til navigering, dynamisk baneplanlegging, operasjoner i bølgesonen og sensorfusjonsmetoder; 2) utvikling av teknologi for operasjoner innen inspeksjon, vedlikehold og reparasjon, eksempelvis inspeksjon av not og fortøyning, samt rengjøring og reparasjon av not; og 3) konsepter og utvikling av teknologi for undervannsdokking, sjøsetting og innhenting av undervannsfartøy ved store bølger.

Kontaktfrie operasjon: Utvikling av metoder for operasjon fra fartøy uten at disse fortøyes direkte til merdene. Forskningsoppgaver i denne sammenhengen er konseptstudier,

simuleringer av grensebetingelser for denne type operasjoner, metode- og algoritmeutvikling for styring av robotarm fra fartøy, samt demonstrasjoner i lab.

Industriell relevans

Løsninger for økt autonomi vil redusere behovet for menneskelig manuelt arbeid og nærvær, og vil muliggjøre økt regularitet og sikkerhet i forbindelse med operasjonene på mer eksponerte lokaliteter.

Forskningsområdeleder: [Esten Ingar Grøtli](#) (SINTEF Digital)



Publikasjoner og rapporter

Arnesen B O, Lekkas A, Schjølberg I, *3D Path Following and Tracking for an Inspection Class ROV*, In: ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2017

Haugaløkken, Bent Oddvar Arnesen; Sandøy, Stian Skaalvik; Schjølberg, Ingrid; Alfredsen, Jo Arve; Utne, Ingrid Bouwer. (2018) Probabilistic Localization and Mapping of Flexible Underwater Structures using Octomap. *European Control Conference 2018 Limassol, Cyprus*.

Grøtli E I, Bjerkgeng M, Rundtop P, Vagia M, Haugli F B, Transeth A, *Canvas as a design tool for autonomous operations: With application to net inspection of a sea based fish farm using an underwater vehicle*, In: Oceans, 2017

Haugaløkken B O A, Jørgensen E K, Schjølberg I, *Experimental validation of end-effector stabilization for underwater vehicle-manipulator systems in subsea operations*, In: Robotics and Autonomous Systems, Vol. 109, 2018

Eidsvik O A, Haugaløkken B O A, Schjølberg I, *SeaArm – A Subsea Multi-Degree of Freedom Manipulator for Small Observation Class Remotely Operated Vehicles*, In: European Control Conference, 2018

Bjerkgeng M, Kirkhus T, Caharija W, Thielemann J T, Amundsen H B, Ohrem S J, Grøtli E I, *ROV Navigation in a Fish Cage with Laser-Camera Triangulation*, In : Journal of Marine Science and Engineering, 2021

Karlsen H Ø, Amundsen H B, Caharija W, Ludvigsen M, *Autonomous Aquaculture: Implementation of an autonomous mission control system for unmanned underwater vehicle operations*, In: Oceans 2021

Ohrem S J, Amundsen H B, Caharija W, Holden C, *Robust adaptive backstepping DP control of ROVs*, *Control Engineering Practice*, 2022

Masteroppgaver og avhandlinger

Cheri L O, *Net-relative localization algorithm for fish cage inspection operation*, MSc thesis, UIO, 2018

Azam W, *Robust Distance Estimation of Remotely-Operating Underwater Drones for Monitoring Applications*, MSc thesis, NTNU 2020

Karlsen H Ø, *Towards Autonomous ROVs in Aquaculture: Implementation of Autonomous Mission Control for Unmanned Operations*, MSc thesis, NTNU 2021

Nguyen K H, *Control of Unmanned Subsea Vehicles Operating at Exposed Fish Farms in Presence of Environmental Disturbances*, MSc thesis, NTNU 2021

Haugland K S, *Underwater Pose Graph SLAM with DVL-Enhanced Visual Loop Closure for Future Aquaculture*, MSc thesis, NTNU 2021

Drønen V Ø, *Guidance and maneuvering principles for autonomous ROV missions in an aquaculture context*, MSc thesis, NTNU 2021

Autonom teknologi for IMR-operasjoner i havbruk

VEILEDERE

Professor [Ingrid Schjøberg](#) (NTNU)
Professor [Ingrid B. Utne](#) (NTNU)

PERIODE

Q3 2016 – Q3 2019
Disputert 13. januar 2020

Dette doktorgradsarbeidet studerer måter å utvikle autonom teknologi for inspeksjon, vedlikehold og reparasjon i havbruk. Hovedsakelig gjelder dette bruk av undervannsroboter og lavkost-utstyr som kan brukes på innsiden av en merd.

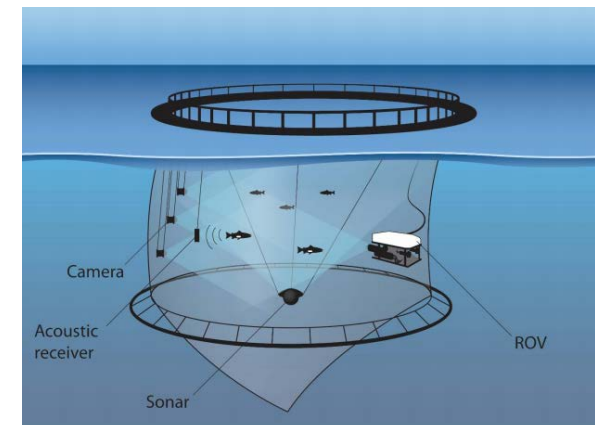
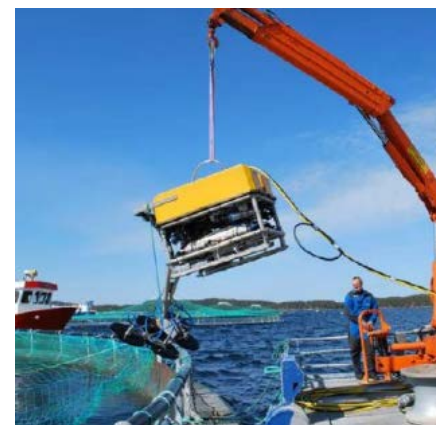
Utfordringene er mange innen inspeksjon, vedlikehold og reparasjon i og utenfor tradisjonelle merder i havbruk. Blant utfordringene er hull i nota som kan lede til rømming i stor skala. En av årsakene til at det blir hull i nota er sliteskader over tid som et resultat av notvask. Inspeksjon av nota er derfor påkrevd etter hver vaskeoperasjon. Felles for slike operasjoner er at de må utføres periodisk, og er dermed utmerkede kandidater for mer automatisering.

Undervannsfarkoster representerer en type verktøy som kan utføre autonom inspeksjon regelmessig. Dersom farkosten er utstyrt med en robotarm er den også i stand til å utføre små vedlikeholdsoperasjoner og reparasjoner.

Dette doktorgradsarbeidet forsøker å vise hvordan en liten observasjonsklasse ROV kan

benyttes til å utføre enkle vedlikeholdsoppgaver. Det er utviklet styringsstrategier som muliggjør at farkosten kan holdes stødig selv under svake strømmer.

Et system som muliggjør autonom plukking av gjenkjennbare objekter har blitt utviklet og verifisert i bassengtester. Plukking av objektet ble oppnådd ved å bruke kameraet i ROVEN, maskinsyn for å kjenne igjen objektet vi ønsker å gripe, en smart algoritme for å estimere den relative avstanden til objektet og styringssystemer for ROV-arm-system. Objektet flyter fritt i vannsøylen, der ROV og robotarm holder en bestemt posisjon relativt til objektet før det forsøker å gripe objektet. Eksempler på anvendelsesområder er plukking av død fisk, installasjon eller innhenting av sensorer i merden, kutting av tau eller hente objekter som har falt ned i notposen.



Haugaløkken, Bent Oddvar Arnesen; Jørgensen, Erlend Kvinge; Schjøberg, Ingrid. (2018) [Experimental Validation of End-Effector Stabilization for Underwater Vehicle-Manipulator Systems in Subsea Operations](#). *Robotics and Autonomous Systems*. vol. 109.

Eidsvik, Ole Alexander; Haugaløkken, Bent Oddvar Arnesen; Schjøberg, Ingrid. (2018) [SeaArm - A Subsea Multi-Degree of Freedom Manipulator for Small Observation Class Remotely Operated Vehicles](#). *European Control Conference 2018 Limassol, Cyprus*.

Haugaløkken, Bent Oddvar Arnesen; Sandøy, Stian Skaalvik; Schjøberg, Ingrid; Alfredsen, Jo Arve; Utne, Ingrid Bouwer. (2018) [Probabilistic Localization and Mapping of Flexible Underwater Structures using Octomap](#). *European Control Conference 2018 Limassol, Cyprus*.

Arnesen, Bent Oddvar; Lekkas, Anastasios M.; Schjøberg, Ingrid. (2017) [3D Path Following and Tracking for an Inspection Class ROV](#). *ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering - Volume 7A: Ocean Engineering*.

Haugaløkken, BOA, (2020) [Autonomous Technology for IMR Operations in the Norwegian Aquaculture](#). Doctoral thesis at NTNU, 2020:9

Haugaløkken, Bent Oddvar Arnesen; Skaldebø, Martin Breivik; Schjøberg, Ingrid. (2020) [Monocular vision-based gripping of objects](#). *Robotics and Autonomous Systems*. Vol 131.

Navigasjon av undervannsfarkost relativ til merd

VEILEDERE

Professor [Ingrid Schjøberg](#) (NTNU)
Professor [Ingrid B. Utne](#) (NTNU)

PERIODE

Q3 2016 – Q2 2020
Disputert 2020

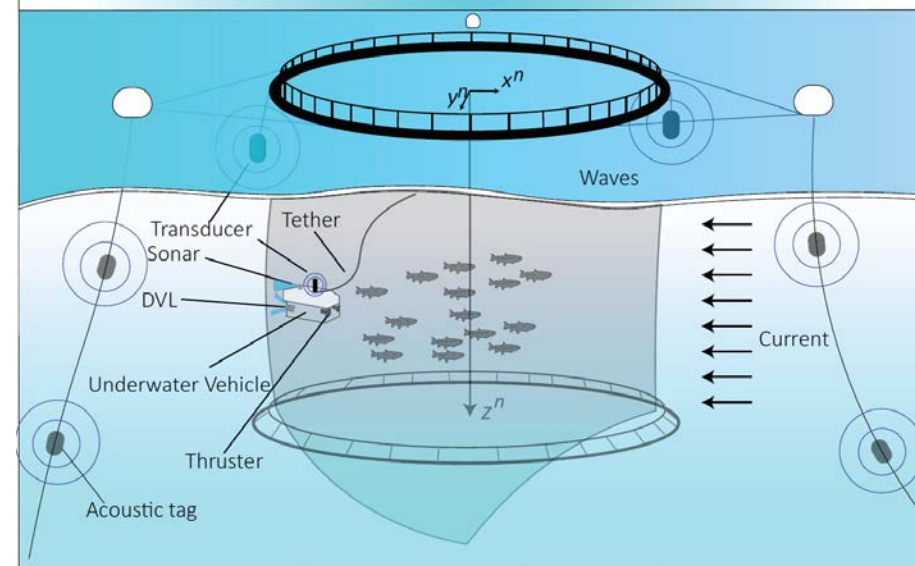
Dette doktorgradsprosjektet studerte lokalisings- og kartleggingsmetoder for undervannsroboter for å forbedre inspeksjon av fiskemerder. Risiko reduseres når man reduserer konvensjonelle inspeksjonsmetoder som bruk av dykkere.

Fiskemerder må periodisk inspiseres for å kunne avdekke skader på nett, forankring eller andre problemer. Inspeksjonen er tradisjonelt gjennomført med dykkere eller fjernstyrte undervannsroboter med et eller flere kameraer.

Dette prosjektet benytter treghtetsnavigasjon, akustiske sensorer og bruk av moderne lokalisings- og kartleggingsmetoder som setter sammen sensordataene. Dette er viktig for å kunne oppnå høy nok kvalitet på navigasjon av undervannsroboter til å automatisere inspeksjonsprosessen og øke kvaliteten på fremstillingen av de samlede dataene etter inspeksjon.

Hovedresultater:

- Utviklet lokalisings- og kartleggingsmetode ved bruk av sonar og treghtetsnavigasjon.
- Utviklet metode for kartlegging av forankringssystem ved bruk av akustiske tags.
- Utviklet effektiv digital kartrepresentasjon av fiskermerd som kan brukes innen moderne lokalisings- og kartleggingsmetoder.



Sandøy, S. S., Hegde, J., Schjøberg, I., Utne, I. B., [Polar Map: A method for 3D Mapping of Fish Cages](#). *Aquacultural Engineering*, Volume 89, 2020, 102039, ISSN 0144-8609

Sandøy, S. S., Matsuda, T., Maki, T., Schjøberg, I., (2018) [Rao-Blackwellized Particle Filter with Grid-Mapping for AUV SLAM Using Forward-Looking Sonar](#). *Proceedings of MTS/IEEE Oceans'18, Techno-Ocean 2018 - OTO'18*.

Haugaløkken, B.; Sandøy, S. S.; Schjøberg, I.; Alfreidsen, J. A.; Utne, I. B.. (2018) [Probabilistic Localization and Mapping of Flexible Underwater Structures using Octomap](#). *European Control Conference 2018 Limassol, Cyprus*.

Sandøy, S. S., Schjøberg, I.. (2017) [Experimental verification of underwater positioning system in aquaculture](#). *IEEE OCEANS 2017 - Aberdeen*.

Sandøy, S. S.; Schjøberg, I.. (2017) [Underwater Positioning Using Near Surface Long Baseline Transponder's Induced by Wave Motion](#). *ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering - Volume 7A: Ocean Engineering*.

Sandøy, S.S. (2020) [Acoustic-Based Probabilistic Localization and Mapping for Unmanned Underwater Vehicles in Aquaculture Operations](#). *Doctoral thesis 2020:208, NTNU*

Modellering og kontroll av undervannsfartøymanipulatorsystemer (UVMS) innen oppdrettsnæringen

VEILEDERE

Professor [Martin Ludvigsen](#) (NTNU)
Professor [Bjørn Egil Asbjørnslett](#) (NTNU)
Professor [Pål Lader](#) (NTNU)
Dr [Eleni Kelasidi](#) (SINTEF Ocean)

PERIODE

Q3 2021 – Q3 2024

Grunnlaget for dette doktorgradsprosjektet er å bidra til utviklingen av autonome undervannsfartøymanipulatorsystemer tilpasset eksponerte forhold.

Fokusområdene for dette prosjektet er: 1) Nøyaktig dynamisk modellering av UVMS 2) Sanntidsestimering av bølgekraftene på systemet, og 3) Systemintegrasjon av de ulike subsystemene i en helautonom manipulatoroperasjon. Prosjektet er organisert i følgende arbeidspakker:

Arbeidspakke 1: Estimere og kompensere for koblingskraftene mellom undervannsfartøyet og manipulatorarmen ved bruk av simuleringmodeller/eksperimentelle forsøk

Arbeidspakke 2: Utnyttelse av bølgeradardata og datadrevne metoder for å predikere bølgekraftene på roboten i sanntid for å etablere nøyaktige operasjonelle grenser og å bidra til bedre

beslutningsstøtte

Arbeidspakke 3: Sammenkoble forskjellige subsystemer (lavt-høyt nivå kontroll og sensorene) og til slutt demonstrere en helautonom manipulatoroperasjon i et forsøksanlegg

Siden er sist oppdatert 2023.

Status og videre arbeid:

- Utviklet et simuleringstilbud og data pipeline for datainnsamling og databehandling (Ferdig)
- Videreutvikling av aktuelle infrastruktur ved AURLab (NTNU)/SINTEF Ocean for eksperimentelle forsøk (Pågående)
- Evaluering av forskjellige av datadrevne metoder på simulert/empirisk data (Pågående)
- Datainnsamling og behandling av bølgeradardata (Videre arbeid)
- Planlegging av systemintegrasjonstester/eksperimentelle forsøk (Videre arbeid)



Kontaktfrie operasjoner i havbruk med Reinforcement Learning

VEILEDERE

Professor Kerstin Bach (NTNU)
Professor Helge Langseth (NTNU)

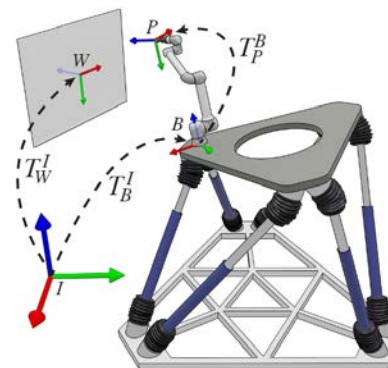
PERIODE

Q3 2020 – Q3 2024

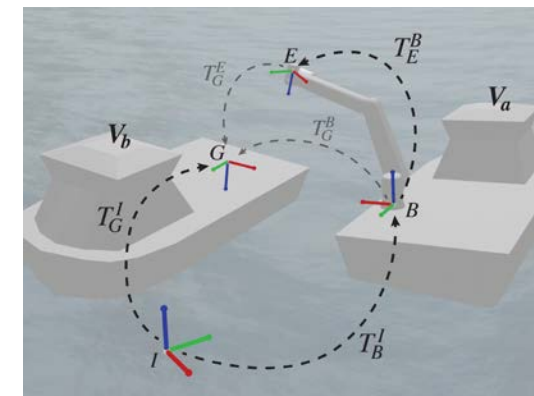
Dette doktorgradsprosjektet har som mål å utvikle automatiserte kontrollsystemer for robot arm/kran i forbindelse med kontaktfrie operasjoner på havbrukslokaliteter.

Flytting av havbruksnæringen til eksponerte områder byr på utfordringer rundt operasjoner som gjennomføres i og på merden. Regelmessige operasjoner inkluderer fjerning av død fisk, mating, avlusing, og inspeksjon av merden. Grunnet tøffere forhold er tidsvinduene der disse operasjonene kan gjennomføres på eksponerte lokaliteter både mindre og mer uregelmessige. I tillegg kommer utfordringer knyttet til helse, miljø og sikkerhet for personell, og det er derfor interessant å utforske muligheter til automatisering.

Mange av operasjonene som gjennomføres kan bli bistått av en kran - eller stor robotarm - som er montert på et nærliggende fartøy. I dette prosjektet fokuserer vi på kontaktfrie operasjoner, altså scenarier der fartøyet ikke er fysisk fortøyd til merden. Dette resulterer i et komplekst kontrollproblem der man må kompensere for relativ bevegelse mellom fartøy og strukturer i sjøen. Målet er å supplere eksisterende kontrollalgoritmer med Reinforcement Learning (RL), et underfelt av maskinlæring som kan brukes til å "lære" styringsystemer.



Figur 1: Illustrasjon av hexapod-oppsettet som ble benyttet i (1.)



Figur 2: Illustrasjon av fartøy-til-fartøy problemstillingen som ble utforsket i (2.)

Status og videre arbeid:

1. Journalartikkel: [Brandt, Martin Albertsen and Herland, Sverre and Gutsch, Martin and Ludvigsen, Halgeir and Grøtli, Esten Ingar, **Towards Autonomous Contact-Free Operations in Aquaculture**](#)
2. Konferanseartikkel: Herland, Sverre and Kerstin, Bach, Vessel-to-Vessel Motion Compensation with Reinforcement Learning, IAAI 2023
3. Nye modellforsøk med hexapod - lignende (1.) - gjennomført mars 2023.
4. Forsøk og artikkel som følger opp på fremtidig arbeid beskrevet i (2.) vil bli gjennomført senere i 2023.

PROSJEKTLEDER

Esten Ingar Grøtli (SINTEF Digital)

PARTNERE INVOLVERT

SINTEF Ocean, SINTEF Digital, NTNU IMT, Argus, Lerow, Kongsberg Maritime, AQS

PERIODE

Q2 2015 – Q1 2023

TYPE FORSKNING

Industriell/Grunnleggende

Prosjektet har utviklet og demonstrert autonom funksjonalitet for et robotisert undervannsfartøy utstyrt med nødvendig verktøy for å utføre hyppige operasjoner på eksponerte anlegg.

Hyppig og komplette inspeksjoner av nøter i fiskemerder er en viktig oppgave i dagens oppdrettsanlegg, og vil sannsynligvis bli enda viktigere dersom denne typen merder skal brukes på mer eksponerte lokaliteter.

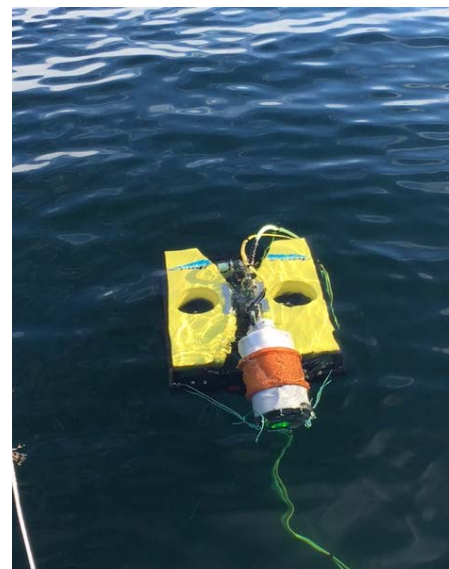
Inspeksjon gjøres for å sikre integriteten av anlegget og hindre rømming av fisk. Med forbedret teknologi antas det at inspeksjon kan gjøres mer effektivt og billigere enn manuell inspeksjon av dykkere. Bruk av dykkere er også mer begrenset med tanke på værforhold på eksponerte lokaliteter.

Siden merdene er fleksible strukturer med varierende geometri stiller dette spesielt strenge krav til navigasjons- og kontrollsystemet, både for å få inspisert

hele nota, men også for å unngå kollisjon.

Bruken av maskinsyn for inspeksjon er utfordrende pga varierende lysforhold, begroing, og turbiditet i vannet.

Dette prosjektet har hatt fokus på å løse noen av de grunnleggende utfordringene for et autonomt inspeksjonssystem.



Resultater:

- Laserassistert kamerasystem for lettvektsposisjonering av AUV/ROV
- Modellbaserte og datadrevne metoder for deteksjon av hull i not
- Not-relativ lokalisering
- Konseptstudie på ROV-LARS

Innovasjonspotensiale:

- Bruk av ROV med autonome funksjoner for inspeksjon, vedlikehold og reparasjon på dagens merder:
 - Hulldeteksjon i not
 - Hardware og software for relative posisjonering til not eller andre elementer
 - Kartlegging av merd

Assosierte prosjekter:

- Reducing risk in aquaculture, 2016-2019
- SEATONOMY, 2013-2017

Not-relativ lokalisering

For ROV-inspeksjon av notintegriteten i fiskemerder er det viktig å kunne vite posisjonen og orienteringen til ROV i forhold til merda. Her er informasjon fra flere sensorsystemer brukt til å gi et best mulig estimat av hvor ROVen befinner seg.

Rov-posisjonen i nota kan brukes til kollisjonsunngåelse med notveggen og til å forhindre at ROV-tether setter seg fast; til å nøyaktig bestemme hvor et hull var detektert med maskinsynalgoritmen; til å vite hvilken del av merda som allerede er inspisert; og til å planlegge ROVens bevegelser for å inspisere resten av notstrukturen.

Vår løsning for not-relativ lokalisering kjører direkte på ROV'en, og baserer seg i hovedsak på:

- 1) Laser-triangulering som måler notveggenes posisjon relativ til ROV'en
- 2) Et yaw-kompass som gir ROV'ens retning relativt til Nord.
- 3) En sylindermodell av nota.

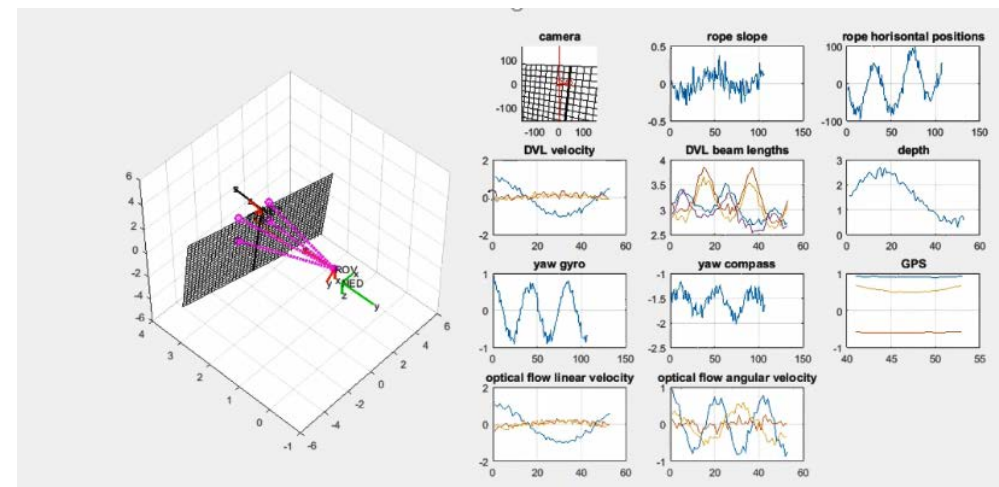
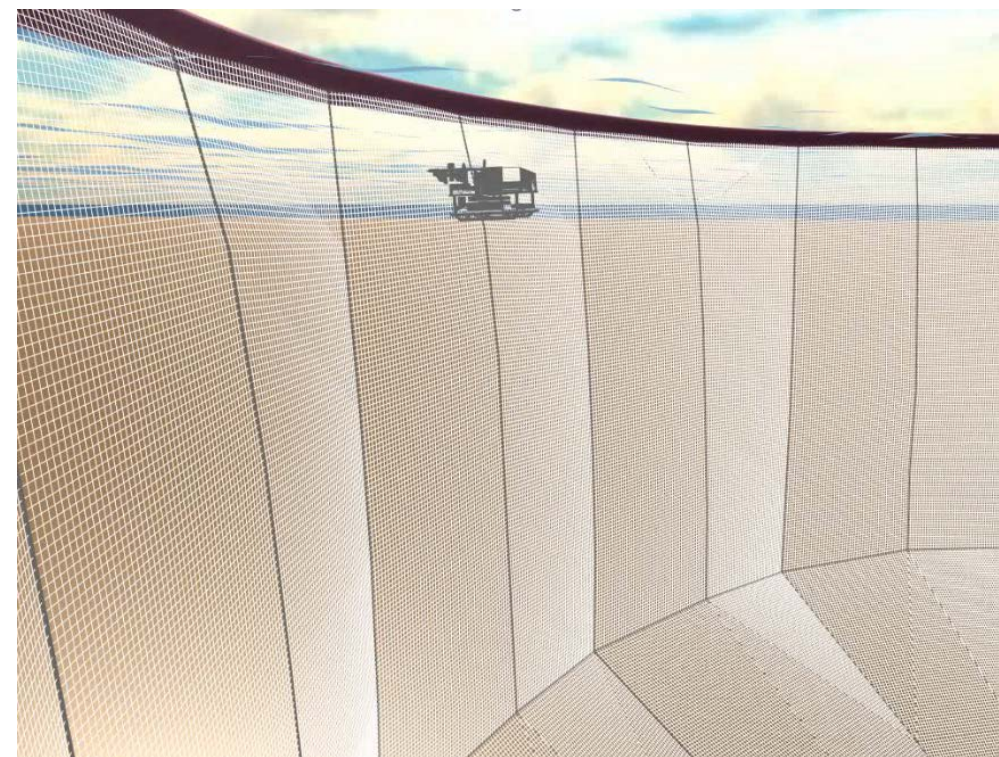
Disse 3 antagelsene er nok til å

posisjonere ROV'en i Nota ved hjelp av et Extended Kalman Filter.

Løsningen trenger ikke dyre sensorsystemer som for eksempel USBL eller DVL.

Vi har testet posisjoneringsalgoritmen med ekte sensordata, og verifisert at vi oppnår sammenlignbar ytelse med en USBL-sensor.

Sist oppdatert 2022.

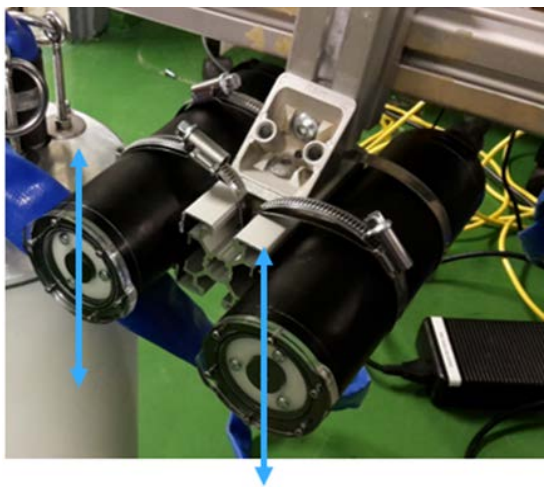


Laserassistert kamerasystem for lettvektsposisjonering av ROV

SINTEF Ocean og SINTEF Digital har utviklet et kamerabasert system for posisjonering av ROV relativt til nota.

Å belyse med en laserlinje gjør det mulig å få dybdeinformasjon i bilder tatt med kamera som typisk allerede finnes på ROVer. Ideen her er å bruke to parallelle lasere for å kunne beregne både posisjon og orientering av ROV relativt til notveggen (ved f.eks. inspeksjon). Dersom kameraet peker rett mot notveggen vil laserlinjene kunne sees som to parallelle linjer. Peker kameraet derimot ikke rett på notveggen vil det være en vinkel mellom linjene som kan brukes til å beregne den relative orienteringen.

Etter suksessfull demonstrasjon av systemet i innendørs basseng, ble det høsten 2020 testet i en operativ merd. ROVen var også utstyrt med en Doppler Velocity Log (DVL)

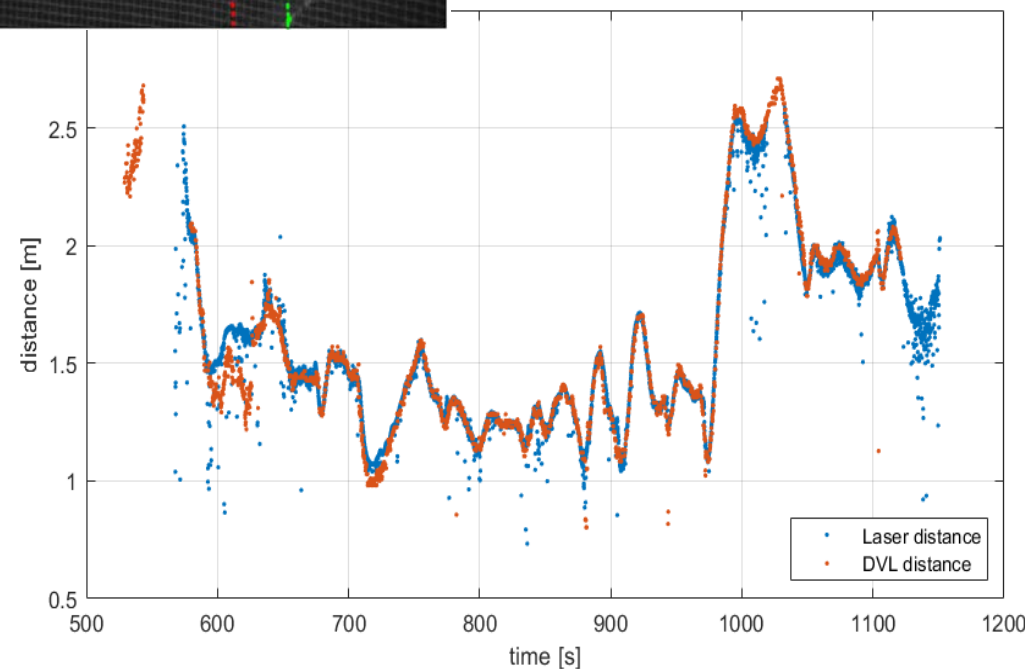
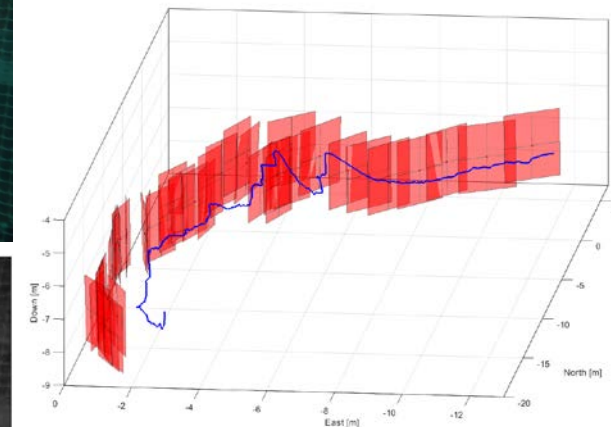
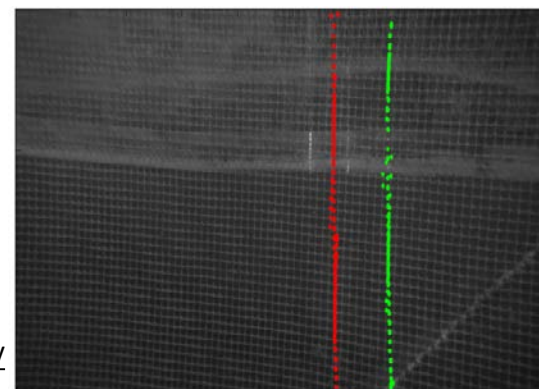
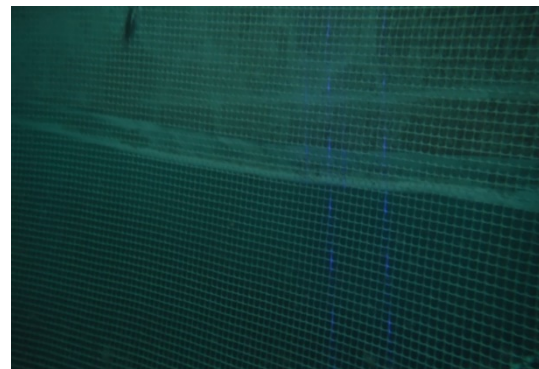
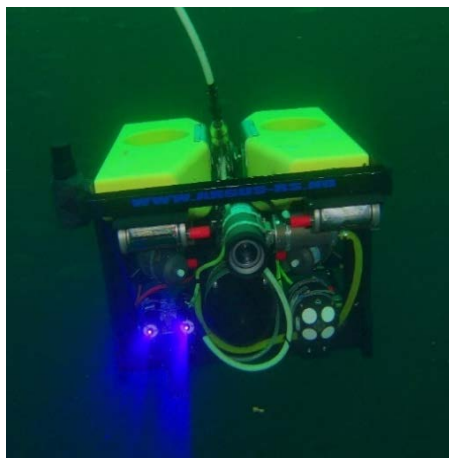


som ble brukt for validering.

Resultatene viste veldig god sammenheng mellom DVL og det laserassisterte kamerasystemet både for målt avstand og orientering (se figur nede til høyre). Vi anser derfor at dette systemet har stort innovasjonspotensiale da prisen for DVL gjerne er 10-100 ganger dyrere enn lasere og nødvendig tilbehør.

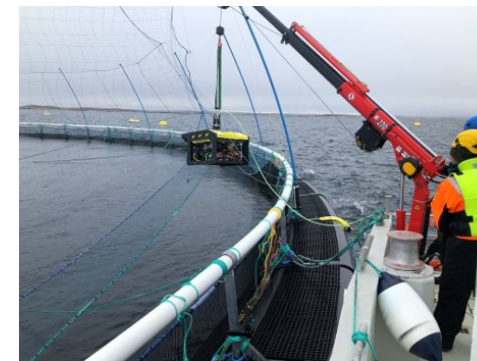
Resultatene er publisert i [Bjerkeng et al, ROV Navigation in a Fish Cage with Laser-Camera Triangulation, Journal of Marine Science and Engineering.](#)

Denne siden ble sist oppdatert i 2021.



Posisjons- og hastighetsregulering av ROV

SINTEF Ocean og NTNU har utviklet regulatorer for robust kontroll av ROV i eksponerte farvann. Den første regulatoren er en adaptiv DP-regulator som automatisk stiller regulatorparametere basert på estimering av strømhastighet og av ROV-ens hydrodynamiske parametere. Den andre regulatoren er en modellbasert hastighetsregulator som bruker estimert strømhastighet til å kontrollere ROV-ens hastighet.



For å kunne gjennomføre autonome operasjoner med ROV-er er det kritisk med god regulering av ROV-ens posisjon, orientering og hastighet. Dette er spesielt utfordrende i eksponert havbruk, der bølge- og strømkrefter kan gi store forstyrrelser.

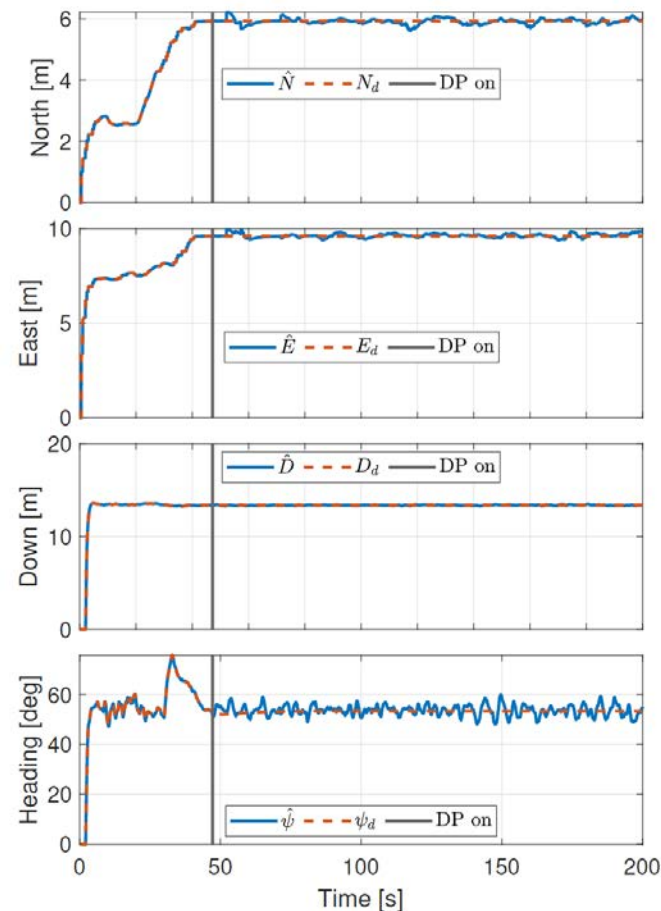
SINTEF Ocean har utviklet en dynamisk posisjonings (DP)-regulator som gjør det mulig å få en ROV til å holde en stasjonær posisjon og retning, også under påvirkning av havstrømmer og andre forstyrrelser. DP-regulatoren er en adaptiv regulator, som betyr at den aktivt prøver å estimere ROV-ens hydrodynamiske parametere og strømhastigheten, samt bruke disse estimeringene til å stille på regulatorparametere. Dette gjør den robust for modellusikkerheter og eksterne forstyrrelser, samt gjør det raskere å finne gode regulatorparametere. Våren 2021 ble

regulatoren testet i en operasjonell merd hos SINTEF ACE.

For å få en ROV til å følge en ønsket bane, må man regulere hastigheten til ROV-en. SINTEF Ocean og NTNU har sammen utviklet en regulator som styrer ROV-ens hastighet både i den tverrgående og langsgående retning. Regulatoren er modellbasert og vil estimere strømhastighet for å kompensere for havstrøm. Også denne regulatoren ble testet hos SINTEF ACE våren 2021.

Resultatene er publisert i [Ohrem, Amundsen, Caharija and Holden, Robust adaptive backstepping DP control of ROVs, Control Engineering Practice 2022.](#)

Siden er sist oppdatert i 2022.



Autonom oppdragskontroll for ROV

Sammen har NTNU og SINTEF Ocean jobbet mot helautonome ROV-operasjoner i merder ved å implementere et kontrollsystem som automatisk skal overvåke og velge mellom ulike oppdrag.

Når havbruk beveger seg til eksponerte lokaliteter kan man redusere risiko for personellskader og øke værviduet for ROV-operasjoner ved å introdusere autonome ROV-systemer.

En tidligere SINTEF-utviklet metode muliggjør autonom notfølgning ved å benytte en Doppler Velocity Log (DVL) ([Artifex](#), 2016-2021). Basert på DVL-målingene så beregnes ROV-ens posisjon og orientering relativt til notveggen. Fra et grafisk grensesnitt, så kan operatøren få ROV-en til å bevege seg horisontalt eller vertikalt langs notveggen med en ønsket dybde og hastighet.

Et nytt utviklet oppdragskontrollsystem har som mål i å få ROV-en til å autonomt traversere og kartlegge en hel not ved å estimere progresjon av inspeksjonsoppdraget, og dermed smart styre i ønsket retning. På sikt er det ønsket å utvide systemet med flere

kontrollfunksjonaliteter.

Systemet er testet i simuleringer og på SINTEF ACE våren 2021. Simuleringsresultatene er gode, mens feltresultatene viser at systemet er avhengig av bedre estimering av oppdragsprogresjon. Dette gjenstår som videre arbeid.

Resultatet er publisert i [Karlsen, Amundsen, Caharija and Ludvigsen, Autonomous Aquaculture: Implementation of an autonomous mission control system for unmanned underwater vehicle operations, Oceans 2021](#)

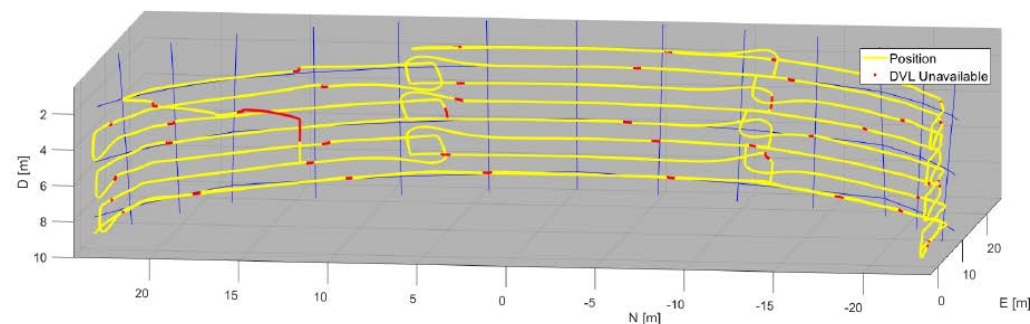
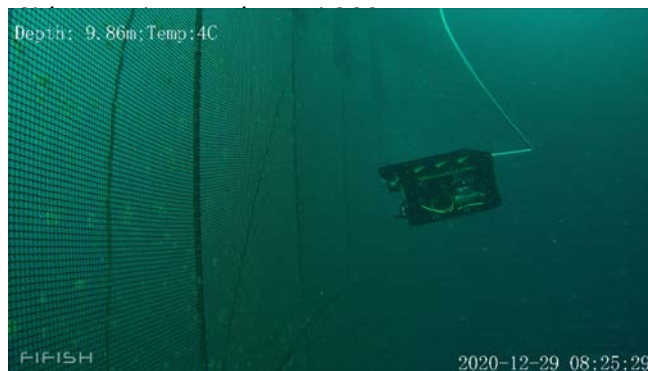


Fig. 3. The ROV trajectory during the first half of the full simulated net inspection

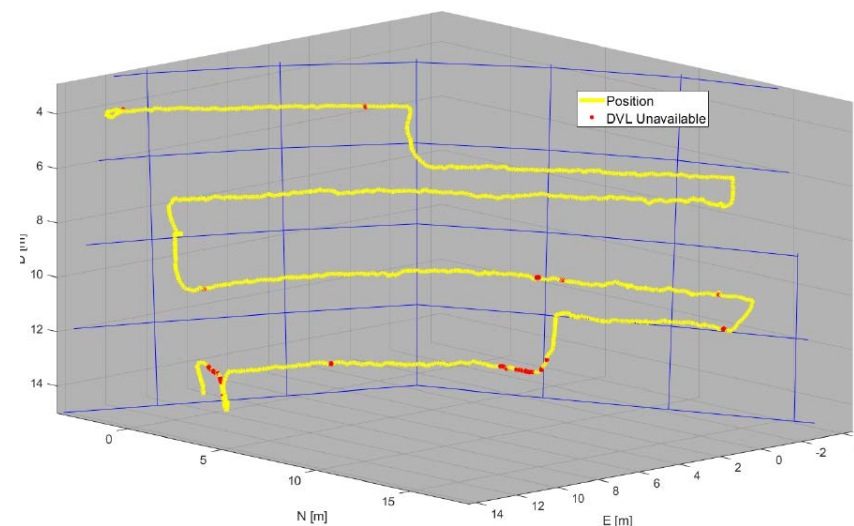


Fig. 4. 3D plot showing the trajectory of the ROV during the field test at SINTEF ACE Råtaren in March 2021

Modellbaserte og datadrevne metoder for deteksjon av hull i not

SINTEF Ocean og SINTEF Digital har samarbeidet om utvikling og forbedring av algoritmer for automatisk å finne hull i not. Både en modelldrevet og en datadrevet tilnærming er benyttet. Den førstnevnte utnytter kunnskapen om nettstrukturens grunnleggende geometri, og den andre lærer fra en stor mengde videodata hvordan en intakt not ser ut, og indikerer når den observerer noe uvanlig eller ødelagt not i en videostrøm.

Modellbasert deteksjon av hull: Den modellbaserte tilnærmingen utnytter bildebehandling og maskinsynsteknikker for å identifisere knutene og/eller hullene i en notstruktur. Deretter undersøkes det om den lokale maskestrukturen er som forventet. Fordelen med denne tilnærmingen er at den ikke trenger mye treningsdata. Det er imidlertid nødvendig å tilpasse metoden til forskjellige lysforhold – nettet kan være lysere enn omgivelsene eller mørkere på grunn av bakgrunnsbelysning. Videokvaliteten må også være rimelig god, det vil si at maskene skal være godt synlige, ikke for mye uskarphet på grunn av bevegelse eller fokusinnstillinger. Tang som dekker mer enn en enkeltmaske, blir registrert som et avvik og bli markert som mulig hull. Dette kan håndteres av en tilleggsalgoritme som lærer hvordan begroing og tang vil se ut i videoen. Bildene nederst til høyre viser deteksjon av et hull i en inspeksjonsvideo fra en merd ([Schellewald, C., Stahl, A., "Irregularity detection in net pens exploiting computer vision, CAMS 2022"](#)).

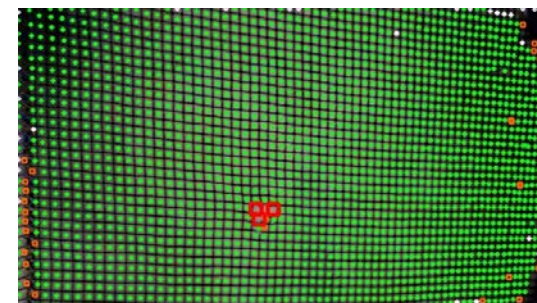
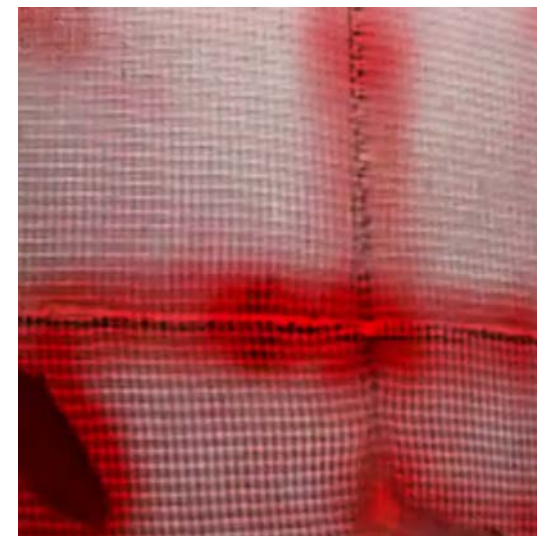
Datadrevet deteksjon av avvik i not: En av de fundamentale gjennombruddene senere år innen dyplæring er at man kan designe et nevralt nettverk som kan lære seg å beskrive et bilde ved hjelp av

små byggesteiner, kalt egenskaper. Disse egenskapene er lært direkte fra å putte data/bilder inn i nettverkene, uten noe brukermedvirkning. Mates nettverket med tilstrekkelig mye data, vil altså et nettverk lære seg egenskapene som behøves for å løse oppgaven. (For eksempel; et nettverk som skal detektere ansikter vil lære seg egenskaper som vagt likner neser, øyne og munn – samt hvordan disse egenskapene vanligvis kombineres i et ansikt – veldig likt hvordan et menneske også gå frem for finne et ansikt.)

Vi har bygget videre på disse ideene, og trener nettverket med videoer av ikke-skadede nøter med forskjellige forstyrrende elementer (begroing, fisker som skygger for nettet osv.), støy og varierende belysning. Slik lærer nettverket hva som er "normalt" og kan dermed detektere avvik fra normalen.

Resultatet er at repeterte mønster (maskene i not) observeres som normalt, mens f. eks. nettstrukturer (tau ol.) markeres som avvik. Avvikene kan så mates inn i en klassifikator (nettverk) for å kategorisere avvikene inn i ulike kategorier som strukturell, fisk, hull osv.

Sist oppdatert 2022.



Konseptstudie på ROV-LARS

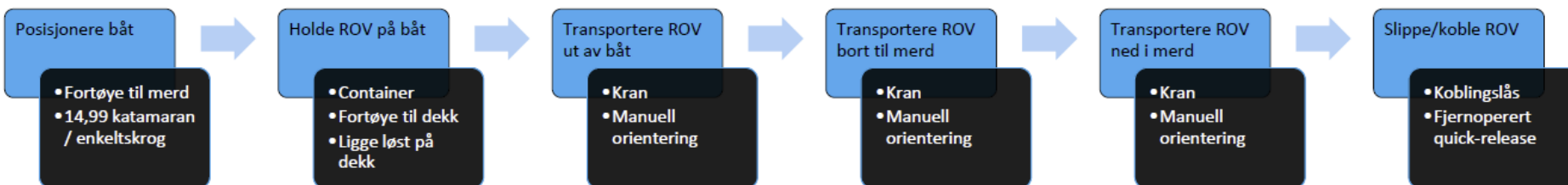
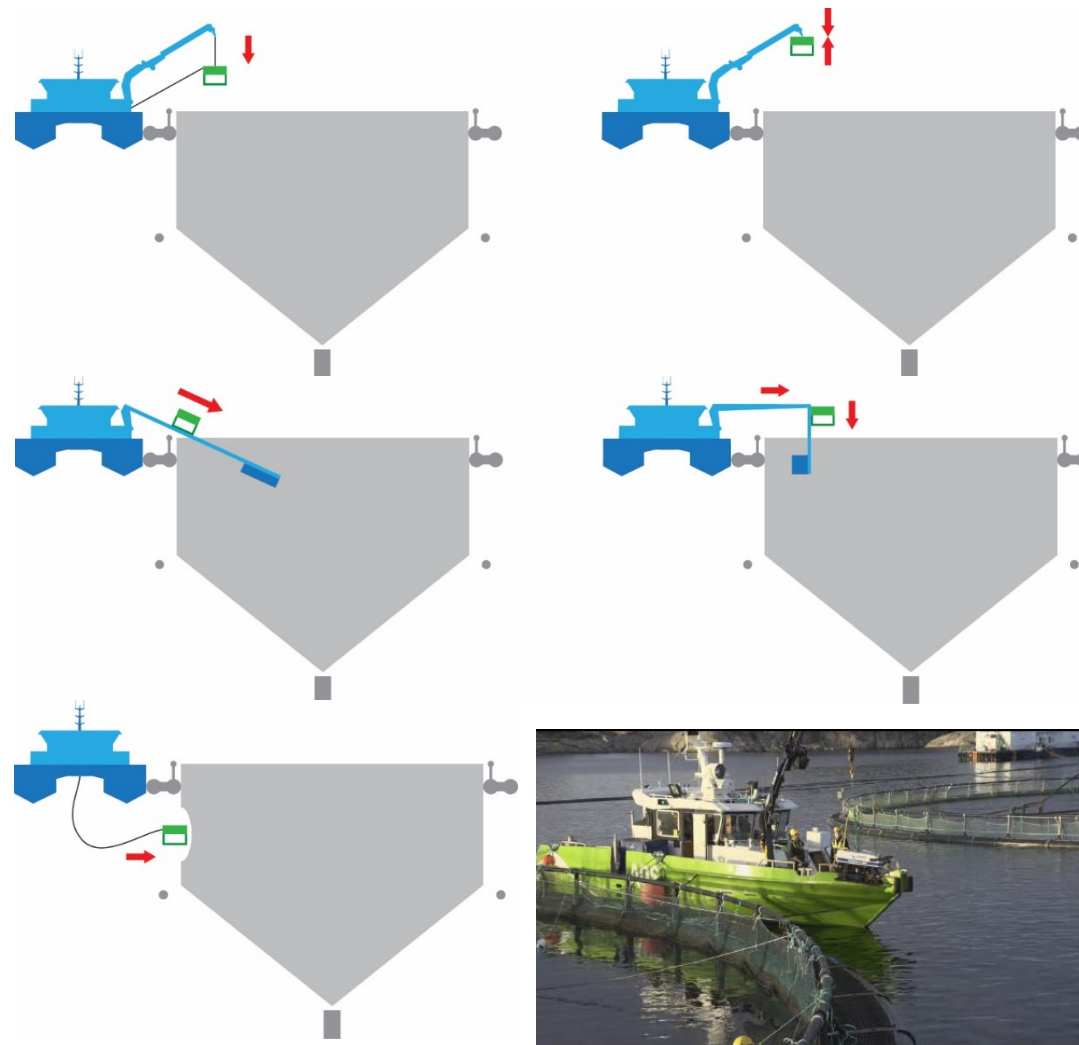
Det ble gjennomført en konseptstudie på LARS (eng: "Launch and Recovery") av ROV i merd. utfordringene er blant annet at man ved store bølger får ukontrollerte pendelbevegelser med ROV som hengende last, og at det blir stor relativ bevegelse mellom kran og flytende ROV i høye bølger.

Dagens løsning for å sette ut en ROV består typisk i å: posisjonere båt, holde ROV på båt, transportere ROV ut av båt, transportere ROV bort til merd, transportere ROV ned i merd og så slippe/koble fra ROV.

Denne konseptstudien vurderte forskjellige LARS-løsninger basert på kravspesifikasjoner gitt av kategoriene miljø, forskrifter, sikkerhet, bruk og økonomi.

Løsningene som ble vurdert var:

- Nivå 1: Tugger-vinsj og justert pendel
- Nivå 2: Sliske
- Nivå 3: Moonpool og gjennomsvømming



PROSJEKTLEDER

Martin Gutsch (SINTEF Ocean)

PARTNERE INVOLVERT

SINTEF Ocean, SINTEF Digital, MacGregor, Kongsberg Seatex, Kongsberg Maritime, AQS, Lerow, Salmar, Cermaq

PERIODE

2019–2023

TYPE FORSKNING

Grunnleggende/Industriell

Målet for prosjektet er å demonstrere simuleringer av hvordan servicefartøy ved ulike værforhold kan utføre operasjoner uten kontakt med oppdrettsanlegget, bortsett fra tilsiktet kontakt mellom anlegget og fartøyets robotarm.

På kort sikt har prosjektet bidratt til å finne de mest relevante operasjonene for bruk av robotarmer på servicefartøy. Når behovet for instrumentering er spesifisert muliggjør det at robotarmene er anvendelig for servicefartøyene i akvakulturvirksomhet for å tilpasse seg den dynamiske bevegelsen mellom servicefartøy og anlegget de arbeider på.

På lang sikt har prosjektet bidratt til bruk av simuleringer ved å teoretisk demonstrere hvordan servicefartøy kan være i stand til å bruke robotarm for forskjellige operasjoner i forskjellige værforhold.

Det er et betydelig potensiale for

innovasjoner som kan utvikle seg fra de helhetlige simuleringene som demonstrerer muligheten til å anvende robotarmer ombord i servicefartøy for sikrere og mer effektive operasjoner, og for å øke værvinduet for disse operasjonene.

Grunnlaget som er utviklet ut fra simuleringene kan senere benyttes til å utvikle fysiske modeller, prototyper og kommersielle løsninger.

Demonstrasjon av simuleringene ble utført ved animasjoner som viste interaksjon mellom fartøy, robotarm og flytende objekter brukt innenfor akvakultur.



Innovasjonspotensiale:

- Kontaktfrie operasjoner mellom fartøy og merd
- Fleksible operasjoner med redusert risiko for skade på mennesker, fisk og strukturer
- Større værvindu for å utføre operasjoner

Assosierte prosjekter:

- [P2 Multioperasjons robotsystem for inspeksjon og intervensjon i merd](#)
- [P3 Fartøy-struktur interaksjon](#)
- [P12 DEMO Tilstandsestimering og operasjonsplanlegging i sanntid](#)
- [P13 Operasjonsplanlegging](#)
- [P8/P18 e-Infrastruktur](#)

Simuleringer av DP-operasjoner tett på en fiskemerd

I prosjektet har vi beregnet fartøysbevegelsene til et servicefartøy i DP-modus rett ved siden av et oppdrettsanlegg, samt bevegelsen til en fiskemerd i forskjellige bølgehøyder. En robotarm benyttes for å kompensere for den relative bevegelsen mellom fartøyet og et valgt punkt på flytekragen til merden. Resultatene har blitt brukt i Fo1 til å beregne operabilitet og begrensende faktorer ved kontaktfri operasjoner.

Relative bevegelser mellom et typisk oppdrettsfartøy for oppdrettsanlegg (katamaran, lengde: 25m, bredde: 12m) og en fiskemerd (diameter: 50m) er beregnet for sjøtilstander med 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m og 2,5 m signifikant bølgehøyde og konstant strøm på 0,3 m/s.

Fartøyets RAOer ble beregnet med VERES og brukt i tidsdomenesimuleringsverktøyet SIMO.

Merdebevegelsene ble først beregnet med FhSim og eksportert sammen med de benyttede bølger. Dette ble importert til SIMO som simulerte fartøyets bevegelser i forhold til merden med samme værkonisjon. Den relative bevegelsen mellom fartøy og et valgt punkt på merden ble brukt som input for kompensasjonsalgoritmen til en manipulatorarm, generert basert på et aktuelt design fra MacGregor. Resultatene

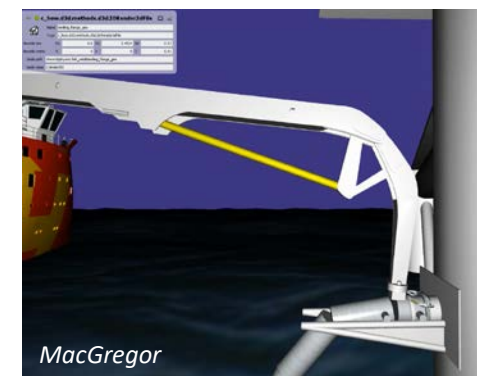
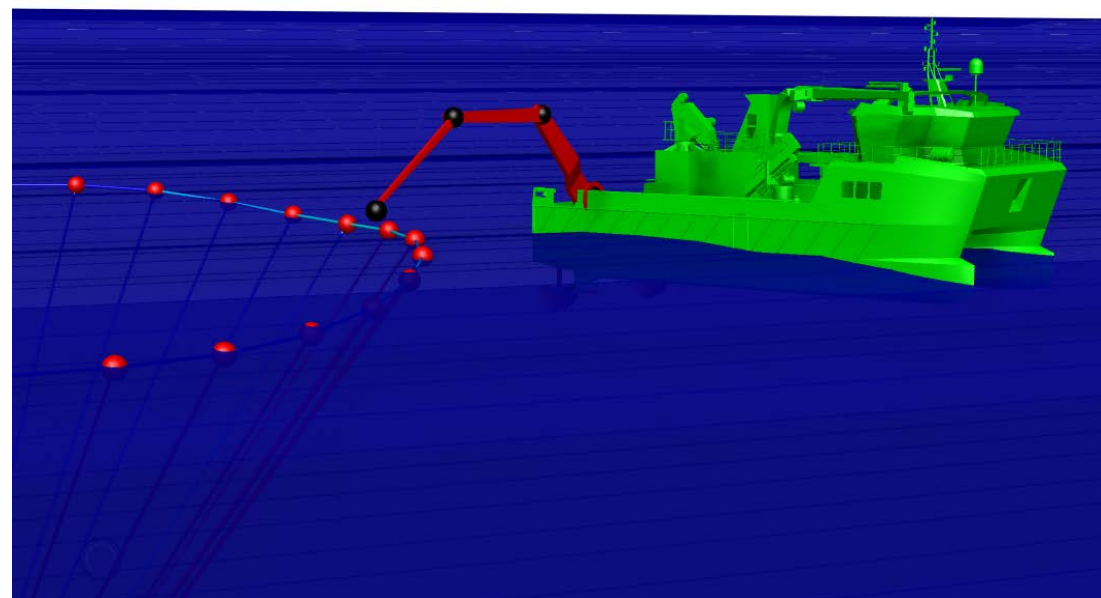
ble visualisert i SIMA.

Det er de tekniske og fysiske begrensningene til robotarmen som setter driftsbegrensninger for det brukte fartøyet.

Generelt skal muligheten for utskifting av risikabelt og arbeidskrevende arbeid for oppdrettspersonell som står på flytekragen vurderes. Her skal det settes særlig fokus på operasjoner som krever kontrollerte samhandlinger som tilkobling eller frakobling av slanger, bruk av måleutstyr inne i merden, tilkobling og kontroll av pumper osv.

VERES, SIMO, FhSim og SIMA er SINTEF Oceans egne verktøy.

Denne siden ble sist oppdatert i 2019.



Eksperimentell studie av kontaktfrie operasjoner tett inntil fiskemerd ved bruk av robotarm

Med tanke på større miljøpåvirkning og mindre tilgjengelighet på eksponerte lokasjoner er det foreslått et nytt konsept for kontaktfri operasjoner. Dette innebærer at et en lang robotarm benyttes fra et servicefartøy i DP-modus for å gjennomføre nødvendige arbeidsoppgaver på merden. En eksperimentell studie av dette konseptet er gjennomført i laboratorie. Bevegelsene til et servicefartøy i DP-modus rett ved siden av et oppdrettsanlegg er simulert, og deretter emulert ved at en hexapod beveger seg tilsvarende fartøyet, men på skalert vis. En robotarm benyttes for å kompensere for bevegelsen, i tillegg til å følge en gitt referansetrajektorie. I dette tilfellet skal robotarmen skrive en tekst på en tavle. Resultatene har blitt brukt å vurde konseptet og begrensende faktorer ved kontaktfri operasjoner.

Hovedmålet med dette studien var å eksperimentelt demonstrere at det er mulig å gjennomføre kontaktfrie operasjoner med en robotarm under forskjellige vær- og bølgeforhold, og eventuelt avdekke mulige begrensninger. Hovedbidragene med arbeidet kan oppsummeres som følgende:

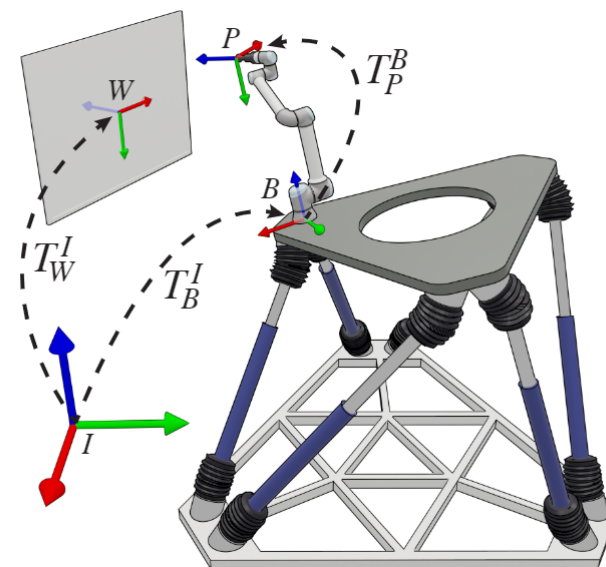
- En beskrivelse og studie av konseptet hvor en manipulator arm brukes i offshore havbruksoperasjoner.
- En realistisk simulering av bevegelsen til et representativt servicefartøy under DP i forskjellige sjøtilstander typisk for havbrukslokasjoner.
- En studie av skalering for den eksperimentelle oppstillingen. Froude skalering ble brukt for å sikre at krefter og akselerasjoner er riktig skalert for å bevare akselerasjoner fra et

tillsvarende full-skala eksperiment.

- Eksperimentell test og evaluering av bevegelseskompensasjon og mulighet for trajektoriefølgning. Fartøysbevegelsen ved robotarmens base er simulert, og deretter emulert ved at hexapoden beveger seg tilsvarende på skalert vis. Koordinatrammer og relevante objekters posisjon og bevegelse er fanget opp ved bruk av et kamerasystem, slik at det er mulig å beregne den ønskede robotbevegelsen i sanntid.

Resultatene er publisert i Brandt, Herland, Gutsch, Ludvigsen and Grøtli, [Towards autonomous contact-free operations in aquaculture](#), *Ocean Engineering*, 2023.

Den siden er sist oppdatert i 2023.



Eksperimentell oppstilling av robotarm montert på hexapod.



Snapshots fra eksperimentet under ytelsestest for fartøysbevegelser ved sjøtilstand $H_s=0.5\text{m}$, $T_p=6\text{s}$ (left) vs. $H_s=2.0\text{m}$, $T_p=9\text{s}$ (right)

Forskningsområde 2 – Overvåkning og beslutningsstøtte av fisk, anlegg og operasjoner

Overvåkning og beslutningsstøtte av fisk, anlegg og operasjoner

Utfordringer

Utvikle robuste og fleksible overvåkingssystemer som kan tilpasses ekstreme klimaforhold.

Utvikle numeriske verktøy for sanntidssimulering av infrastruktur basert på målte data og værprognoser.

Utvikle beslutningsstøtteverktøy for å vurdere systemtilstand, og styre planlegging og gjennomføring av nøkkeloperasjoner.

Forskningsoppgaver

Systemkrav: Identifisere og analysere de ulike undersystemene og parameterne som er nødvendige for en tilstandsvurdering, noe som videre brukes som grunnlag for å definere krav til sensorer og infrastruktur. Kvalifisere hvilke sensorer som er nødvendige for å oppnå tilstrekkelig dekning av anleggets totaltilstand, og vurdere datakvaliteten fra disse. Definere et sett med krav for ICT-infrastrukturer på eksponerte lokaliteter som sikrer robust og pålitelig datafangst.

Sensor- og kommunikasjonssystemer: Identifisere og utvikle nye tekniske løsninger og sensorer for overvåkning av oppdrettsanlegg som også er i stand til å dekke interaksjon mellom undersystemene på anlegget under drift. Feiltoleranse og redundans vil være viktige krav for å utvikle nye innovative løsninger. Kunnskap fra offshore-

industrien vil bli brukt aktivt.

Simulering og prediksjon av lokalitetstilstander og beslutningsstøtte: Kunnskapsbaserte metoder kombinert med numeriske modeller og sensordata vil bli brukt for å simulere tilstanden til fisk og anlegg, automatisere tidlig varsling og tiltak ved hendelser. Videre vil det utvikles beslutningsstøtteverktøy for operasjoner, prediktivt vedlikehold og driftsplanlegging. Omfanget av personellet og operasjonene som er involvert vil gjøre automatisk kontekstbasert tilpasning av informasjon og funksjonalitet nødvendig. Denne oppgaven vil bli integrert med ALLE OMRÅDENE.

Industriell relevans

Resultatene vil sikre god fiskevelferd, redusert risiko for personell og anlegg, redusert miljøpåvirkning, og bidra til økonomiske fordeler gjennom redusere driftskostnader og forbedret kvalitet på sluttproduktet.

Forskningsleder: Jan Tore Fagertun (SINTEF Ocean)



Publikasjoner og rapporter

Bore PT, Amdahl J (2017), *Determination of Environmental Conditions Relevant for the Ultimate Limit State at an Exposed Aquaculture Location*, ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering - Volume 3B: Structures, Safety and Reliability

Bore PT (2017), *Modelling of Hydrodynamic Loads on Aquaculture Net Cages By a Modified Morison Model*, Conference: 7th International Conference on Computational Methods in Marine Engineering

Mathisen BM, Aamodt A, Langseth H (2017), *Data driven case base construction for prediction of success of marine operations*, CEUR Workshop Proceedings

Wienhofen LWM, Mathisen BM (2016) *Defining the initial case-base for a CBR operator support system in digital finishing*. International Conference on Case-Based Reasoning. Springer, Cham

Mathisen BM, Aamodt A, Langseth H, Bach K, (2019) *Learning similarity measures from data*. Progress in Artificial Intelligence

Presentasjoner og konferanser

Fagertun, J.T. (2021) Webinar-presentasjon: "Hva vi har lært av værdataene fra bøyene ved eksponerte anlegg?"

Masteroppgaver og avhandlinger

Ramm HT, Berge AW (2017), *Fleet Scheduling of Service Vessels used in a more exposed Norwegian Aquaculture Industry*

Gyberg Haugland M, Thygesen S (2017), *Use of Clusters in a Route Generation Heuristic for Distribution of Fish Feed*

Håkonsen H (2017), *Emergency Preparedness and Response in Aquaculture - Simulation of Vessel Response Time for Sheltered and Exposed Fish Farms*

Tuverud Kamphus M (2017), *Modeling of Seaborne Transport of Fresh Salmon - Inventory Routing with Continuous Time Formulation for a Perishable Product*

Næstvold EA (2017), *Simuleringsmodell som beslutningsstøtte for valg av tiltak mot lakselus på lokalitetsnivå*

Stemland R (2017), *Assessment of Service Vessel Operability In Exposed Aquaculture - An exploratory approach combining vessel response and discrete-event simulation*

Haug Lund Ø, Sogge Sjøberg T (2018), *Evaluation and Comparison of Operability and Operational Limits of Service Vessel Designs in Exposed Aquaculture*

Utnytting av datainnsamling for å støtte operasjoner på eksponerte havbruksinstallasjoner

VEILEDERE

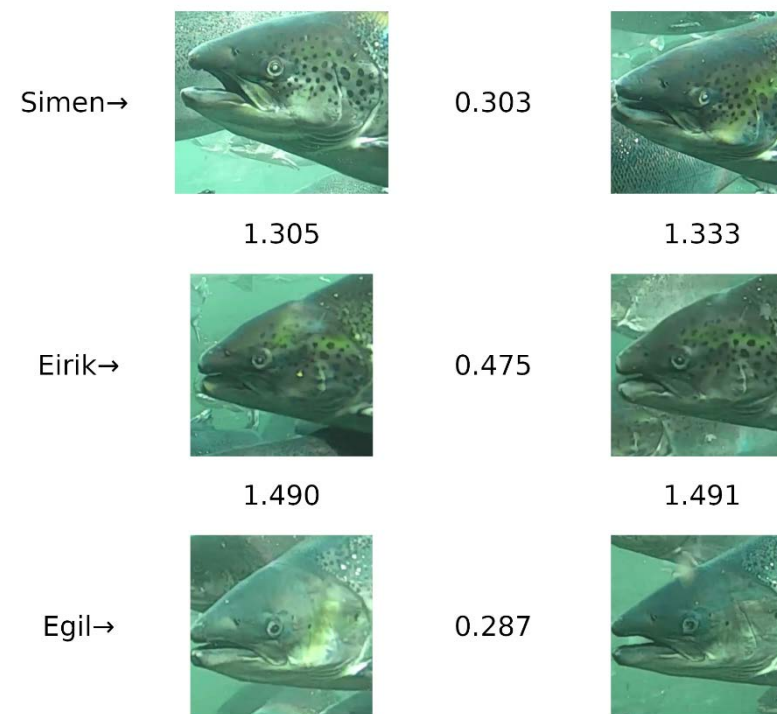
Professor Agnar Aamodt (NTNU)
 Professor Helge Langseth (NTNU)
 Førsteamanuensis Kerstin Bach (NTNU)

PERIODE

Q3 2015 – Q2 2020
 Disputert 2021

Dette doktorgradsprosjektet har som mål å bidra til sikker og bærekraftig produksjon på utsatte lokasjoner. Dette skal oppnås gjennom å ta i bruk menneskelig erfaring kombinert med datainnsamling for overvåkning og operasjonell beslutningsstøtte. Under er resultatene listet opp

1. Bjørn Magnus Mathisen, Agnar Aamodt, and Helge Langseth. [Data driven case base construction for prediction of success of marine operations](#). CEUR Workshop Proceedings, 2017.
2. Leendert WM Wienhofen and Bjørn Magnus Mathisen. "Defining the initial case-base for a CBR operator support system in digital finishing." *International Conference on Case-Based Reasoning*. Springer, Cham, 2016.
3. Kerstin Bach, Bjørn Magnus Mathisen, Amar Jaiswal. [Demonstrating the myCBR Rest API](#). CEUR Workshop Proceedings 2019
4. Bjørn Magnus Mathisen, Agnar Aamodt, Kerstin Bach, and Helge Langseth. [Learning similarity measures from data](#). Progress in Artificial Intelligence, Oct 2019.
5. Bjørn Magnus Mathisen, Kerstin Bach, Espen Meidell, Håkon Måløy, and Edvard Schreiner Sjøblom. [Fishnet: A unified embedding for salmon recognition](#). Frontiers in Artificial Intelligence and Applications. IOS Press, 2020.
6. Bjørn Magnus Mathisen, Kerstin Bach, and Agnar Aamodt. [Using extended siamese networks to provide decision support in aquaculture operations](#). Applied Intelligence. Springer, 2021.



Figur 1: Eksempel på resultat fra artikkel nummer 4, som viser et system som kan skille mellom individuelle laks. Figuren viser ulike laks per rad, og to ulike bilder av samme laks per kolonne. Tallene i mellom viser avstanden mellom bildene. Man kan se at bilder av samme individ har mindre avstand enn bilder fra ulike individer.

Utnytting av datainnsamling for å støtte operasjoner på eksponerte havbruksinstallasjoner

VEILEDERE

Professor Helge Langseth (NTNU)
Førsteamanuensis Kerstin Bach (NTNU)

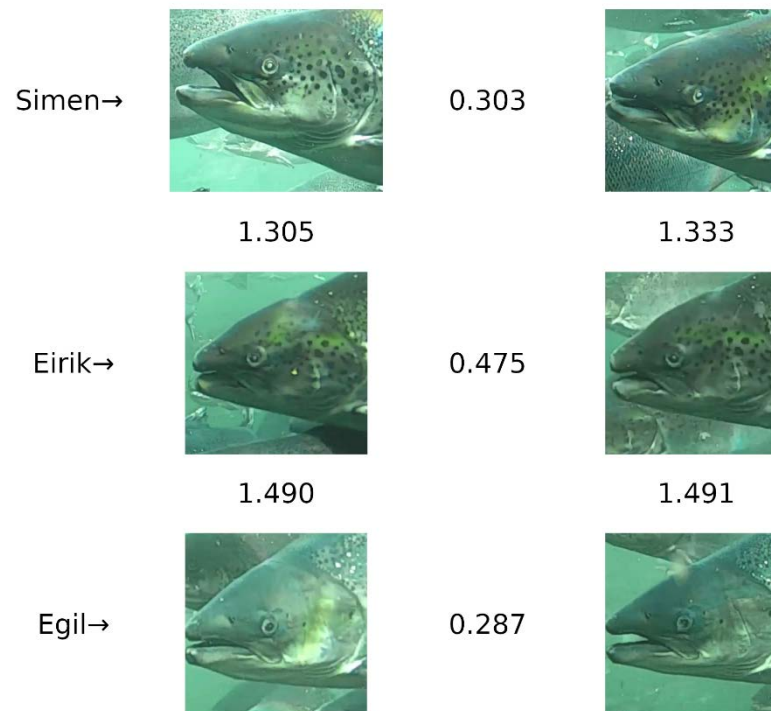
PERIODE

Q2 2022 – Q3 2023

Dette prosjektet planlegger å videreføre resultatene til doktorgradsprosjektet. Vi vil utvide og teste metodene som ble utviklet for datadreven operasjonsplanlegging. Samtidig vil se etter nye muligheter for å anvende data og ML for å automatisere eksponert havdrift.

Status og videre arbeid:

- Planlegger å kombinere arbeidet i publikasjon nr. 6 fra PhD med risikomodellen fra Ingun Holmens arbeid.
- Vil se videre på nye mulige datakilder for å kunne bedre planlegge operasjoner mhp lokasjon og vær



Figur 1: Eksempel på resultat fra artikkel nummer 4 fra PhD prosjektet, som viser et system som kan skille mellom individuelle laks. Figuren viser ulike laks per rad, og to ulike bilder av samme laks per kolonne. Tallene i mellom viser avstanden mellom bildene. Man kan se at bilder av samme individ har mindre avstand enn bilder fra ulike individer.

Gjenkjenning av miljøbetingede adferdsmønstre med dyp læring

VEILEDERE

Professor [Keith L. Downing](#) (NTNU)
Førsteamanuensis [Kerstin Bach](#) (NTNU)
Seniorforsker [Ekrem Misimi](#) (SINTEF Ocean)

PERIODE

Q2 2018 – Q2 2022

"Fish biology in exposed aquaculture" er et fireårig forskningsprosjekt som involverer IMR, NTNU, SINTEF Ocean, Cermaq, Salmar, Marine Harvest og Kongsberg Maritim. Målet med prosjektet er å evaluere fundamentale velferdsindikatorer hos atlantisk laks både på individ- og gruppenivå.

"Fish biology in exposed aquaculture" har som mål å avdekke og validere operasjonelle velferdsindikatorer for bruk inne i oppdrettsmerder. Det ventes at dette vil øke innsikt i hvordan produksjonen påvirker laksens velferd samt forbedrede observasjonsmetoder og verktøy.

Gjennom bruk av datadrevne metoder og maskinlæring vil sensordata samlet fra inne i oppdrettsmerder analyseres for avdekke sammenhenger mellom eksterne miljøfaktorer og adferdsmønstre hos nordatlantisk laks.

Tidligere forsøk med lignende metoder har resultert i gode resultater [1] og tilgang på mer og bedre sensordata muliggjør utprøving og evaluering av kandidatmetoder i labscenarier. De mest lovende metodene vil deretter gjennomgå en storskala evaluering i operativt miljø.

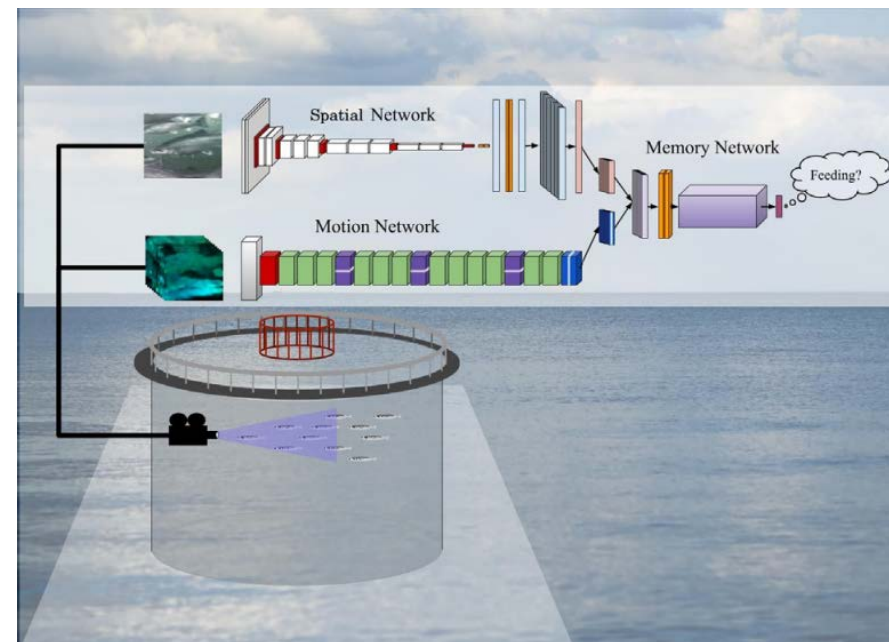
[1] Måløy, Håkon; Aamodt, Agnar; Misimi, Ekrem. (2019) A spatio-temporal recurrent network for salmon feeding action recognition from underwater videos in aquaculture. Computers and Electronics in Agriculture. vol. 167.

Resultater så langt:

- PhD prosjektet har pågått siden april 2018. Den første publikasjonen kom i 2019 med resultater på bruk av video og dype nevrale nettverk for å forstå fôringsmønstre hos laks [1].

Status og videre arbeid:

- En publikasjon er under produksjon med fokus på bruk av ekkodata for deteksjon av sykdom hos laksen.
- Fusjon av ekko- og videodata er en mulig videre vei for større forståelse av laksens behov.
- De metoder som viser lovende resultater vil testes i fullskala produksjonsmiljø i merd mot slutten av prosjektet.



Teknologiske løsninger for sanntidsobservasjon av fysiologi- og atferdsdynamikk hos oppdrettsfisk

VEILEDERE

Førsteamanuensis [Jo Arve Alfredsen](#) (NTNU)
Førsteamanuensis [Martin Føre](#) (NTNU)
Professor [Rolf Erik Olsen](#) (NTNU)

PERIODE

Q3 2018 – Q3 2022

SalmonInsight er et fireårig forskningsprosjekt finansiert av Norges forskningsråd, og inkluderer SINTEF Ocean, NINA, NTNU Institutt for Teknisk Kybernetikk og Institutt for Biologi, Göteborgs Universitet og Sveriges Landbruksuniversitet. Hovedformålet med prosjektet er å finne ny kunnskap om hvordan fysiologi og stress i laks gjenspeiles i observerbare atferdsuttrykk.

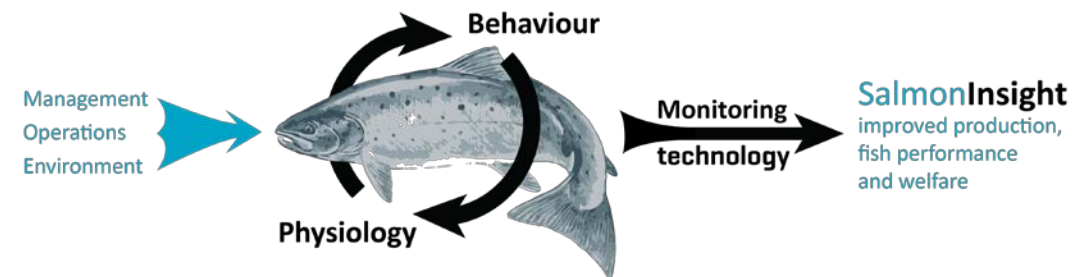
SalmonInsight bygger på konseptet Precision Fish Farming (PFF) (Føre et al., 2018) som har til hensikt å legge til rette for økt bruk av teknologi innen fiskeoppdrett. Det er ventet at dette vil medføre bedre produksjonskontroll, fiskevelferd og redusert dødelighet.

SalmonInsight fokuserer på produksjon av atlantisk laks, og skal for industriell produksjon av denne arten svare på denne utfordringen gjennom å utforske nye teknologier til observasjon av atferdsuttrykk og kople måleresultatene til laksens fysiologi og stress, og derigjennom, velferd.

Gjennom uttesting og evaluering av kandidatteknologier i laboratorieskala på levende laks, skal de mest lovende løsningene til bruk i full skala velges ut. Teknologiene som ventes å ha størst nytteverdi for fullskala industriell produksjon skal deretter testes i et operativt miljø.

Data som samles inn skal analyseres og ses i sammenheng med tradisjonelle målinger for stress hos laks.

Føre, M., Frank, K., Norton, T., Svendsen, E., Alfredsen, J.A., Dempster, T., Eguiraun, H., Watson, W., Stahl, A., Sunde, L.M., Schellewald, C., Skjøien, K.R., Alver, M.O. and Berckmans, D. 2018. [Precision fish farming: A new framework to improve production in aquaculture](#). *biosystems engineering*, 173, pp.176-193.

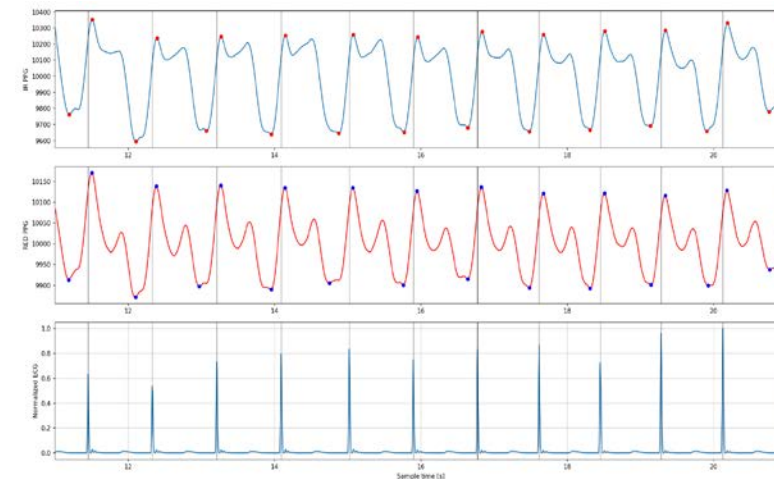


Resultater så langt:

- To forsøk har blitt utført: Et for å undersøke typiske grunnverdier for hjerterate og stress hos laks, og et for å prinsippteste pulsoksimetri hos laks (Figur 1).
- En artikkel er til fagfellevurdering. Ytterligere en artikkel vil publiseres fra pulsoksymetrieforsøkene.
- Et prototype implantat er under ferdigstilling og testing (Figur 2).

Status og videre arbeid:

- Arbeidet startet i august 2018 og varer til og med juli 2022.
- Det kommende året vil fokusere på fullføring av fagplan, planlegging og gjennomføring av forsøk i laboratorie- og full skala hvor målet er å teste og kalibrere pulsoksymetri til bruk på laks.



Figur 1: Eksempel på ECG og pulsoksimetrisignal fra laks.



Figur 2: Prototypeimplantat

P6 Systemer for beslutningsstøtte



PROSJEKTLEDER

Gunnar Senneset [pensjonert] (SINTEF Ocean)
Kontaktperson: [Jan Tore Fagertun](#) (SINTEF Ocean)

PARTNERE INVOLVERT

NTNU IDI, Anteo, Kongsberg Maritime, DNV

PERIODE

Q3 2014 – Q4 2017

TYPE FORSKNING

Grunnleggende

Drift og operasjon av dagens oppdrettslokaliteter krever løpende overvåking av biomasse, miljø og kompleks teknologi for å sikre effektiv og sikker produksjon. Data som samles inn brukes som grunnlag for planlegging og beslutningsstøtte. Etter hvert som industrien tar i bruk mer eksponerte lokaliteter, så er det svært sannsynlig at behovet for systemer for overvåking og beslutningsstøtte vil øke.

Utfordringer med å få personell ut til lokalitetene i perioder med dårlige værforhold vil også kreve mulighet for fjernstyring av utstyr på lokalitetene. Autonome systemer vil bli viktigere, både for å håndtere kritiske situasjoner og for å øke effektiviteten i produksjonen.

Systemer for beslutningsstøtte for operasjoner på eksponerte lokaliteter vil kreve data fra nye typer sensorer i tillegg til de som er brukt i industrien i dag. Det kan også ventes at det er nødvendig å kombinere flere av dagens metoder og verktøy som er i bruk innenfor kunstig intelligens og maskinlæring i dag for å løse utfordringene ved drift og operasjoner på eksponerte lokaliteter.

I den første fasen av prosjektet er hovedmålet å identifisere de viktigste problemstillingene som beslutningsstøttesystemer for eksponerte operasjoner

skal bidra til å løse. Dette inkluderer behovet for nye typer sensorer og andre kilder for informasjon. Rapporten 'Future concepts' som er utarbeidet som en del av SFI EXPOSED vil bli brukt som et utgangspunkt, supplert med mer detaljert gjennomgang og analyse i samarbeid med relevante partnere. Testing av nye typer sensorer og utfordringer med integrasjon av data fra flere kilder vil også være viktige tema.

PROSJEKTLEDER

Jan Tore Fagertun (SINTEF Ocean)

PARTNERE INVOLVERT

SINTEF Ocean, Mowi ASA, Salmar Farming AS, Cermaq Norway AS, Kongsberg Seatex AS, Aqualine AS, AQS AS

PERIODE

Q3 2015 – Q4 2018,
Q1 2019 – Q4 2019

TYPE FORSKNING

Grunnleggende

Oppdrett på eksponerte lokaliteter fordrer robuste og pålitelige anlegg som legger til rette for bærekraft, trygge operasjoner og effektiv produksjon. Data fra meteorologiske, bevegelses- og vannkvalitets-målinger danner grunnlag for utvikling av nye løsninger. P18 bygger videre på P8.

Hensikten med P8 og P18 er å bygge et solid datafundament for utvikling av nye løsninger for infrastruktur, planlegging av operasjoner og for å danne grunnlag fra kravspesifikasjon til fartøy og anlegg for eksponert oppdrett.

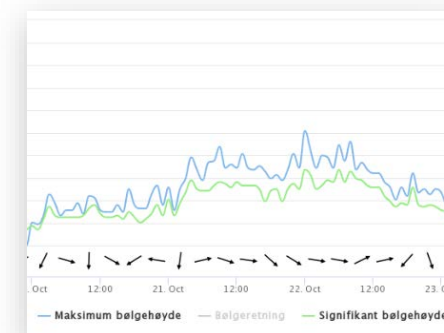
Lange måleserier av meteorologiske forhold (bølger, strøm, vind) legges til grunn for å lage god statistikk både for ekstreme og operasjonelle forhold. Lange måleserier øker kvaliteten på ekstremverdistatistikken.

Statistikken kan brukes til å lage designkrav for nye teknologiske løsninger og for å lage krav til fartøy og anlegg med tanke på daglige operasjoner. Måleseriene kan også brukes til vurdering rundt helse, miljø og sikkerhet for personell som skal jobbe på og i fremtidige eksponerte anlegg.

Videre kan måleseriene også benyttes til softwareutvikling og til validering av laboratorieforsøk.

Andre målinger som vanntemperatur, saltholdighet, oksygenivå etc. kan danne grunnlag for produksjonsplanlegging og dermed danne viktig underlag for økonomiske forhold for operatøren. Vannkvalitetsmålinger kan også brukes til vurderinger rundt fiskehelse og –velferd, samt risiko for begroing, transport av sykdom og parasitter mv.

Målinger av bevegelses-/ kraftrespons på anlegg og fartøy tilknyttet anlegg bruker til å utvikle simuleringsverktøy, som igjen skal brukes som verktøy ved konseptvalg for nye løsninger. Dataunderlaget brukes også som beslutningsstøtte ved planlegging av operasjoner og vedlikehold.



Resultater:

- Måledata fra bøyer, anlegg og fartøy
- Oppbygging av måleinfrastruktur for ad hoc målinger (plug and play)
- Målinger av vannkvalitet på eksponerte lokaliteter
- Logging av operasjonelle begrensninger på 2 lokaliteter

Assosierte prosjekter:

- P12 DEMO Tilstandsestimering og operasjonsplanlegging i sanntid
- P14 DEMO Kontaktfri operasjon ved bruk av robotarm ombord i fartøy

Innovasjonspotensiale:

- Underlag for utvikling av nye løsninger for eksponerte fiskeoppdrett/ tareoppdrett
- Underlag for softwareutvikling/ validering av software og laboratorieforsøk
- Underlag for kalibrering av laboratorier

Måledata fra bøyer, anlegg og fartøy

Måleseriene fra prosjektet er brukt som underlag for flere PhD-kandidater, masteroppgaver og i post-doc-arbeider.

Oppbygging av infrastruktur for datafangst er avhengig av pålitelige komponenter og systemer. Infrastrukturen i prosjektet er utviklet med redundans for å sikre seg mot utfall pga. nettverksfeil eller strømbrudd.

Hardwire nettverk er hovedløsning for dataoverføring, og back-up løsning er via mobilnettverk. Ved strømbrudd vil batterier kunne sende signaler. Ved langvarige strømbrudd vil tap av datasignaler kunne medføre tap av data pga. begrenset batterikapasitet.

Bøyenes energikilde er batterier, og det medfører begrensninger på samlingsfrekvens, midling av verdier og loggefrequens/ frekvens på overføring av data. Bølgemålinger midles over 17 minutter ved 1 Hz og vindmålinger midles over 10 min ved 1 Hz (maks verdier overføres.)

Data fra bøyer, anlegg og fartøy overføres fra målepunktene til databaser på land.

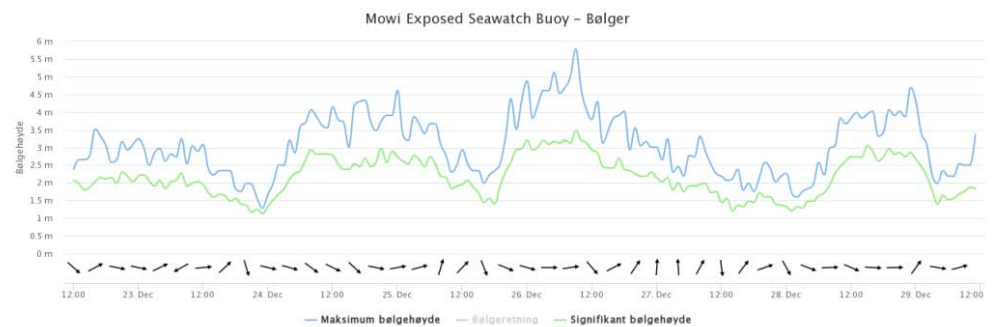
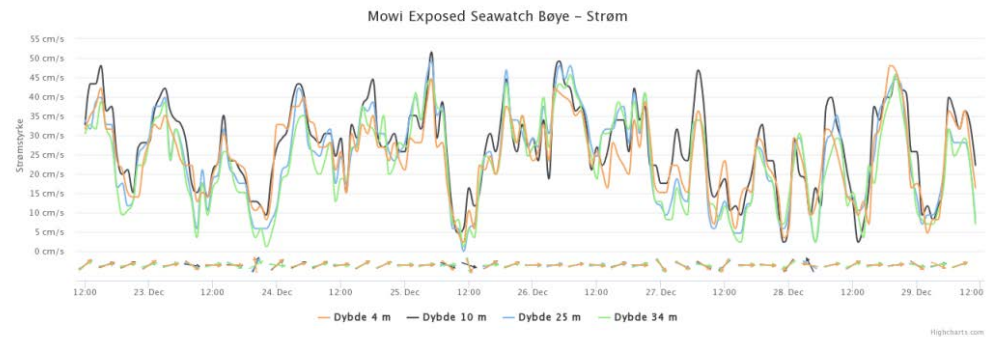
Dataene administreres av SINTEF Ocean, og det gis tilgang til dem ved behov. Prosjektpartnere, PhD-kandidater, MSc studenter og post-doc stipendiater har tilgang til data til bruk i sine arbeider.

Oceanografiske målinger:

- Munkskjæra utenfor Frøya
- Hosenøyen ved Stokkøya/ Fosen
- Sallatskjæra ved Frøya
- Buholmen ved Stokkøya/ Fosen
- Mulen i Nordfolda

Akselerasjoner og bevegelser:

- Valøyen/ Frøya: Fôrflåte, merd og arbeidsbåt
- Hosenøyen: Fôrflåte, merd og arbeidsbåt
- Servicefartøy AQS Loke



Marine Harvest Norway AS: Valøyen i nærheten av Munkskjæra



Kart: Fiskeridirektoratet



Måledata fra bøyer, fartøy og flåter

Målte data er samlet på servere. Det er ikke gjennomført dypere analyser av dataene isolert, men de inngår i flere prosjekter/ studier gjennomført av PhD-kandidater og MSc studenter. Foreløpige resultater for bølgemålinger er presentert her.

Meteorologiske bøyer:

3 stk Fugro SEAWATCH Midi 185 Buoy, hhv MOWI ved Munkskjæra, Salmar ved Sallatskjæra, Hosenøyen og Buholmen (flyttet 2 ganger) og Cermaq ved Mulen.

Sofaroccean Spotter bølgebøye ved Buholmen

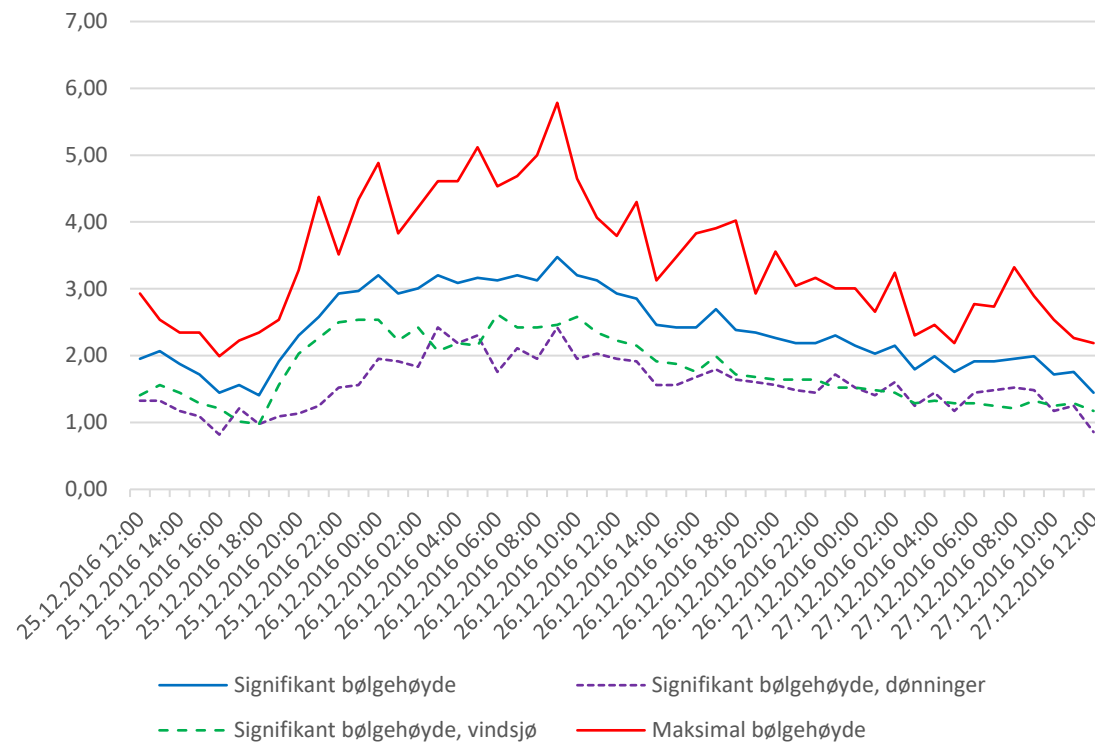
Flåte:

Kongsberg Maritime MRU (Motion Response Unit) og VMM (Vessel Motion Monitor) montert på MOWI flåte ved Valøyen.

Fartøy:

MOWI arbeidsbåter (Herkules og Janker) og AQS servicekatamaran Loke.

Maks hendelse, alle målte data
Meteorologiske bøyer



	MOWI Munkskjæra				Salmar Sallatskjæra				Salmar Hosenøyen				Salmar Buholmen				Cermaq Mulen			
	03.02.2016 13:00		25.02.2019 03:00		09.03.2016 13:00		15.12.2017 00:00		04.04.2018 09:00		26.02.2019 12:00		17.01.2020 08:00		10.03.2020 06:00		21.11.2017 17:00		22.07.2018 12:00	
	Signifikant bølgehoide, Hs [m]	Signifikant bølgehoide, Hm0a [m]	Signifikant bølgehoide, Hm0b [m]	Maks bølgehoide, Hmax [m]	Signifikant bølgehoide, Hs [m]	Signifikant bølgehoide, Hm0a [m]	Signifikant bølgehoide, Hm0b [m]	Maks bølgehoide, Hmax [m]	Signifikant bølgehoide, Hs [m]	Signifikant bølgehoide, Hm0a [m]	Signifikant bølgehoide, Hm0b [m]	Maks bølgehoide, Hmax [m]	Signifikant bølgehoide, Hs [m]	Signifikant bølgehoide, Hm0a [m]	Signifikant bølgehoide, Hm0b [m]	Maks bølgehoide, Hmax [m]	Signifikant bølgehoide, Hs [m]	Signifikant bølgehoide, Hm0a [m]	Signifikant bølgehoide, Hm0b [m]	Maks bølgehoide, Hmax [m]
Maks	3.48	2.42	2.73	5.78	2.03	1.17	1.68	2.97	2.27	1.48	2.19	3.40	1.76	1.13	1.60	3.09	2.50	2.42	1.52	4.14
Gj snitt	0.78	0.41	0.64	1.04	0.53	0.22	0.48	0.64	0.48	0.27	0.38	0.54	0.77	0.42	0.63	1.04	0.22	0.14	0.15	0.15
Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.04	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
St avvik	0.54	0.35	0.44	0.84	0.30	0.16	0.26	0.48	0.40	0.23	0.35	0.65	0.34	0.21	0.30	0.48	0.26	0.21	0.16	0.39
Antall i utvalg	22850	22850	22861	22861	12880	12880	12880	12880	7244	7244	7244	7244	1265	1265	1265	1265	5451	5451	5451	5451



KONTAKTPERSON

Jan Tore Fagertun (SINTEF Ocean)

PARTNERE INVOLVERT

SINTEF Ocean, Kongsberg Maritime, Kongsberg Seatex, Aqualine, MOWI, DNV

PERIODE

Q1 2019 – Q4 2019

TYPE FORSKNING

Industriell

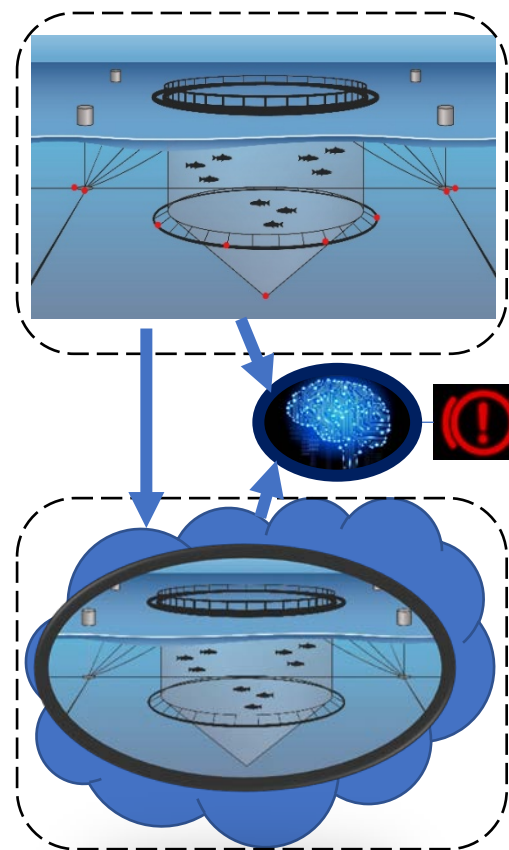
Prosjektet har som mål at utvikle teknologi og metoder for tilstandsestimering av havbruksanlegg, som verktøy for operasjonsplanlegging, analyse og overvåking av fiskevelferd og konstruksjonsintegritet og for planlegging av vedlikehold.

Prosjektet sikter mot å utvikle teknologi og metoder for sanntidsestimering av havbruksanleggets tilstand under drift og operasjoner. Målet er å kunne forebygge eller varsle om skader på anlegget, og derved redusere risikoen for rømming eller trengning av fisk.

Ideen bak tilstandsestimering er bedre å utnytte måledata, gjennom sammenkopling av sensorer og simuleringstverktøy. Utvikling innen havbruk har særskilte utfordringer rundt plassering av sensorer, grensesjiktet mellom fysiske målinger og modellering av fleksible konstruksjoner samt hensynet til fiskens velferd.

Det vil i prosjektet bli utviklet en demonstrator/prototype av systemet, som skal danne fundament for fremtidig utvikling av robuste systemer for tilstandsestimering.

I demonstratoren vil det bli siktet mot å anvende kjent sensor-teknologi og simuleringstverktøy. De primære utfordringer og oppgaver er i kopling, analyse og validering av systemet, samt å identifisere funksjonskrav til instrumentering, hvilke sensorer er det behov for, antall og optimal plassering.



Innovasjonspotensiale:

- Kobling mellom fysiske målinger og simuleringstverktøy i sanntid vil gi økt forståelse for anleggets respons og vil kunne brukes mot validering av simuleringstverktøy og modellforsøk.

Innovasjonspotensiale:

- Fundamentale verktøy for tilstandsestimering

Assosierte prosjekter:

- P13 Operasjonsplanlegging
- P14 DEMO Kontaktfri operasjon ved bruk av robotarm ombord i fartøy
- P8/P18 e-Infrastruktur

Fundamentale verktøy for tilstandsestimering

Virtuell sensor data har blitt brukt for sanntidssimulering av nettdeformasjon og estimering av strømførhold.

En detaljert simuleringmodell av et fullskala oppdrettsanlegg har blitt utviklet, med utgangspunkt i geometrien til SINTEF ACE Rataren. Anlegget er simulert med realistisk representasjon av forankring, nøter, flytekrage mm. Virtuelle målepunkt fra modellen har blitt eksportert som "sensor data" som innputt til en simpel modell for tilstandsestimering.

Noten som sensor

Ved at måle responsen til noten på enkelte diskrete posisjoner er det mulig å bruke estimerings-modeller til å bestemme strøm-hastigheten på lokasjonen.

Dette har blitt testet med virtuell sensor data fra den detaljerte modell.

Estimert strømhastighet har da blitt brukt som input for en simpel sanntidsmodell, for estimering av

deformerte nettstruktur til noten.

Det antas videre at det er mulig å estimere bølgeforhold på lokasjonen, ved bruk av akselerasjonsdata og tilsvarende estimatorer.

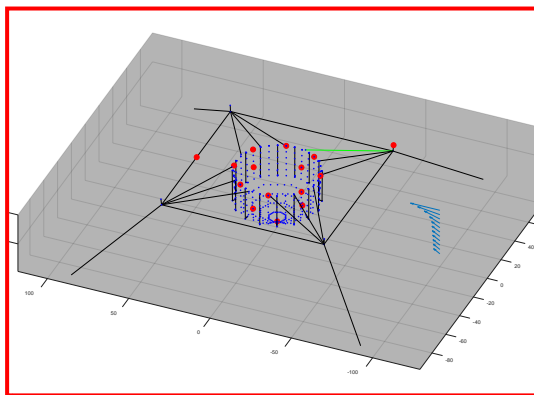
Optimal sensorplassering

Med utgangspunkt i den detaljerte modell har det blitt evaluert optimal sensorplassering for estimering av bølgeforhold ved bruk av statistiske metoder.

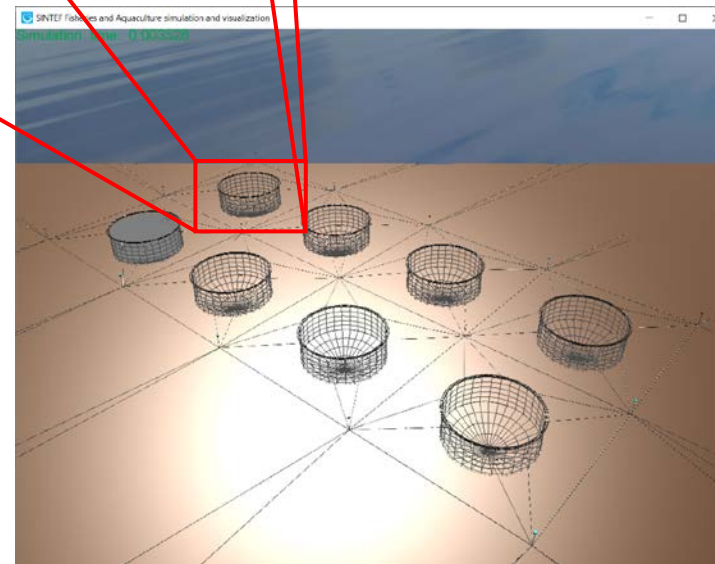
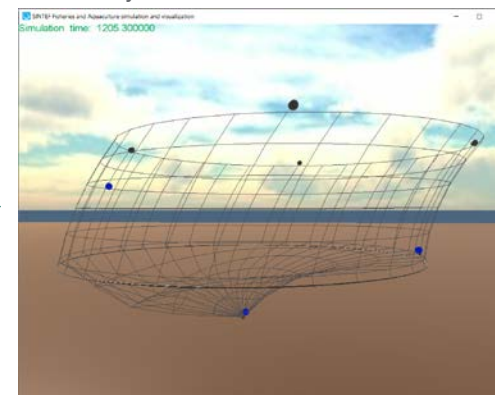
Nytte

Resultatene brukes videre i pågående aktivitet H2 Use case 1 - Digital Tvilling av eksponert havbruksanlegg, og som underlag for SINTEF-prosjektet RACE Digitalcage.

Plassering av virtuelle sensorer.



Sanntidssimulering av strøm og deformasjon av not.



Detaljert modell av SINTEF ACE Rataren for representasjon av "virkelig verden".

Måledata fra bøyer - sammenlikning

Bølgedata fra en ny, mindre bøye er sammenlignet med bølgedata fra en stor, meteorologisk bøye. Bøya fra Sofaroccean (Spotter) har egenvekt på ca 10kg og kan settes ut med håndkraft, mens bøya fra Fugrobøya (ca 600kg) må settes ut med fartøy og kran. En foreløpig analyse av bølgedata, målt med begge bøyer på samme sted (Tristeinen) er presentert.

Bølgehøyde, bølgeperiode og bølgeretning er målt.

Analysen viser godt samsvar på bølgehøyder og brukbart samsvar på bølgeperioder, mens bølgeretning er vanskelig å konkludere.

Videre er det tendens til konvergerende målinger med større bølgehøyde og lengre bølgeperioder.

Foreløpig konklusjon: Bølgebøya fra Sofaroccean gir vel så gode data på bølgehøyde og perioder som den fra Fugro.

Meteorologiske

bøyer:

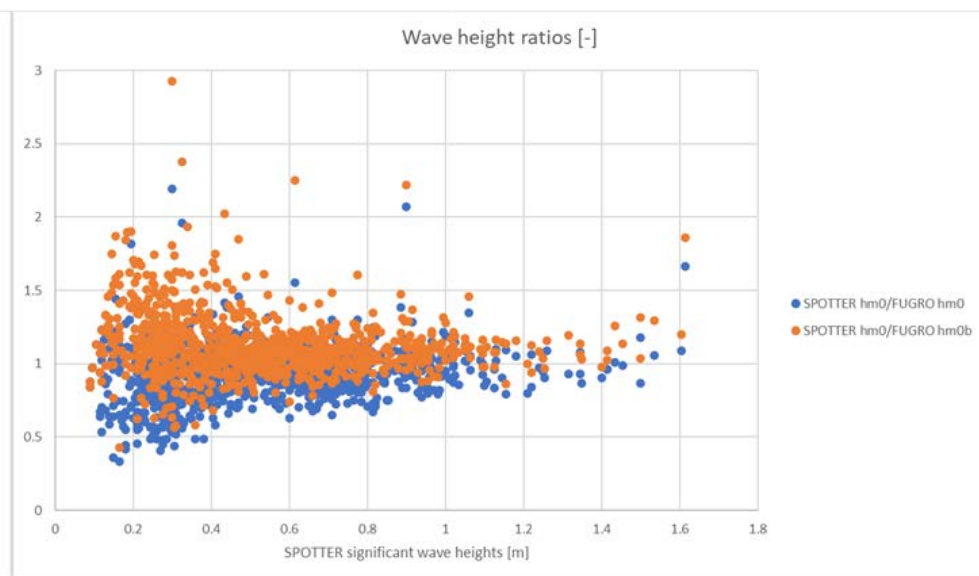
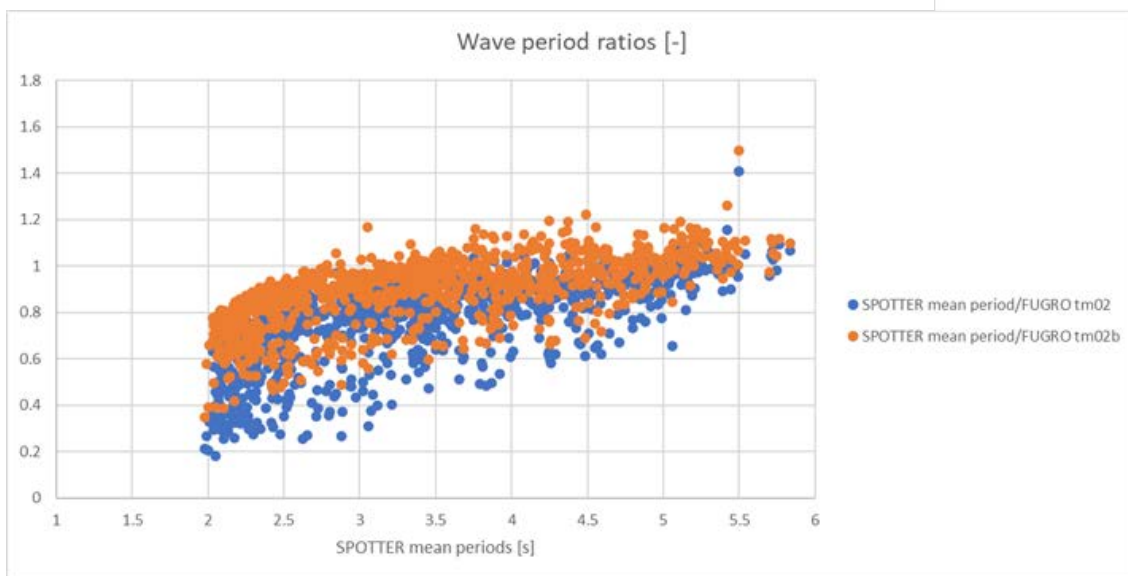
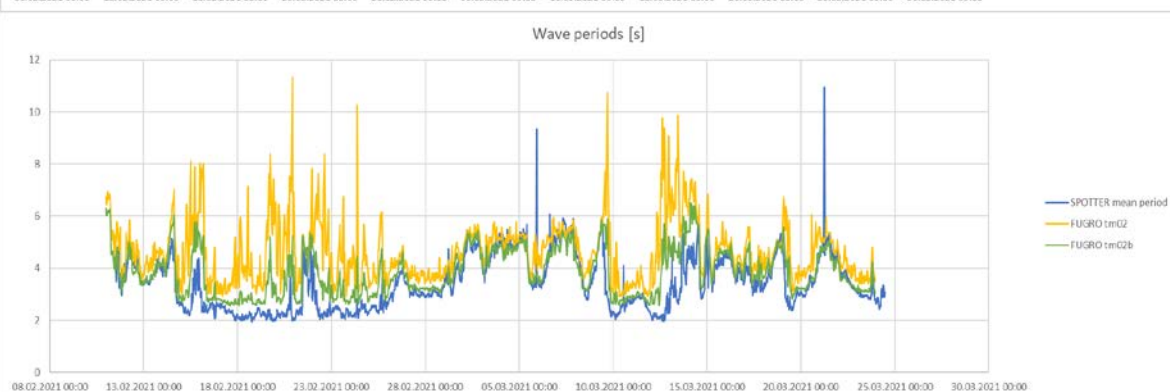
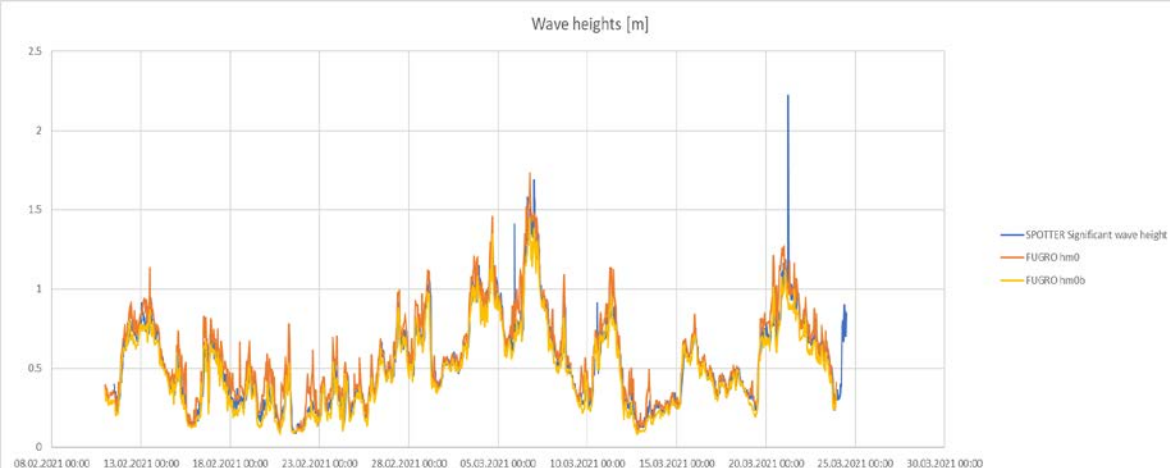
- Sofaroccean Spotter
- Fugro Seawatch
- mid 185

Tidsperiode:

11. februar til 23. mars 2021

Lokalitet:

Tristeinen



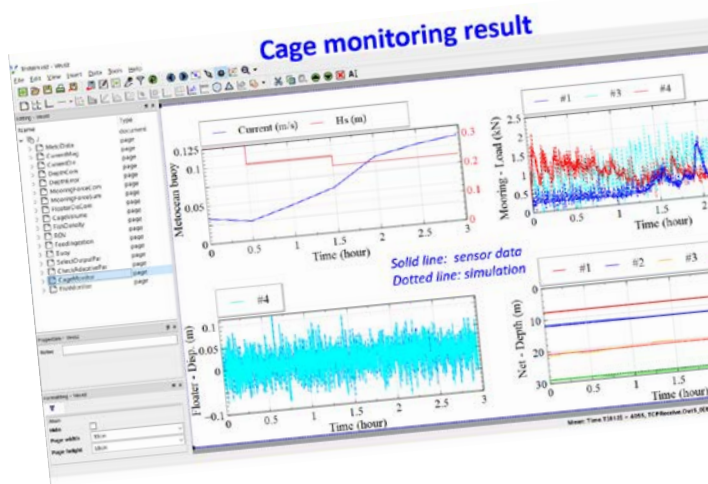
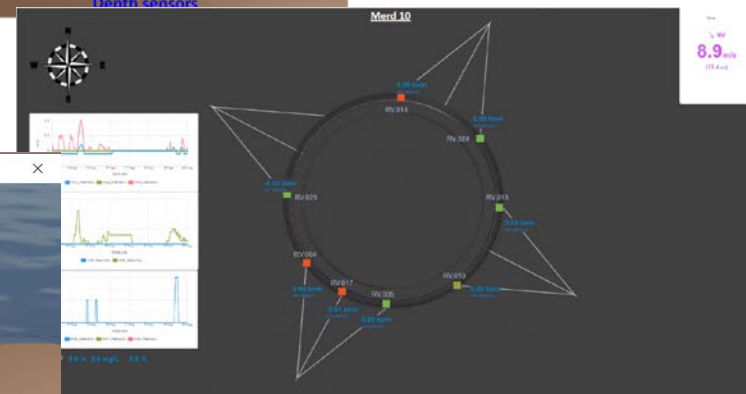
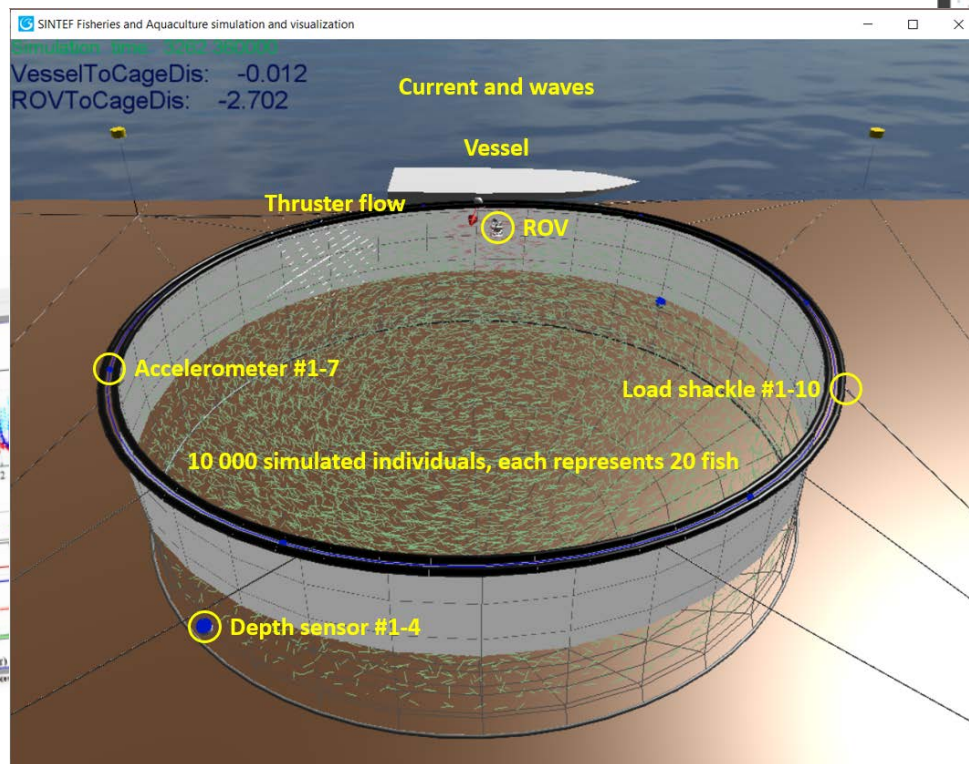
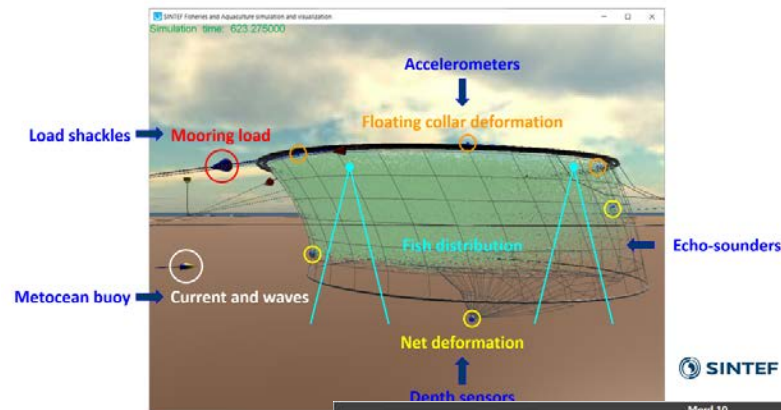
Digital tvilling av eksponert havbruksanlegg

Målinger fra anlegg; lastsjakler, dybdemålere og akselerometre.

Datasimuleringer basert på meteorologiske observasjoner; bølger, vind og strøm. Datasimuleringer av fisk basert på ekkolodd.

Responssimuleringer basert på målinger og værdata.

Den digitale tvillingen tar inn både målte data og simulerte data og visualiserer og dokumenterer responser og adferd til anlegg og fisk.



Et eksempel er bevegelser i not som gir operatøren verdifull kunnskap om forholdene nedover i vannmassene.

Historikken kan brukes til å dokumentere teknisk integritet i livsløpssammenheng. Akutte hendelser kan dokumenteres å være innenfor tålegrens.

PROSJEKTLEDER

Eivind Lona (SINTEF Ocean)

PARTNERE INVOLVERT

Anteo, MOWI, NTNU IMT, SINTEF Ocean

PERIODE

Q1 2019 – Q4 2022

TYPE FORSKNING

Industriell

Prosjektet vil demonstrere bruk av historiske data, sanntidsinformasjon, prognoser, kunnskap om operasjonelle grenser og identifiserte farer i et brukergrensesnitt som metode for operasjonsplanlegging og risikostyring av havbruksoperasjoner utført av eller assistert av servicefartøy.

Formålet med prosjektet er å demonstrere hvordan delvis automatisk datainnsamling kan benyttes i prediksjonsmodeller eller analyseverktøy for å danne et helhetlig planleggingsverktøy for operasjoner.

Bedre forståelse av operasjonelle grenseverdier er essensielt for å kunne utvikle pålitelige analyseverktøy. Prosjektet vil utvikle forbedrede metoder for å samle inn kvalitative data fra havbruksoperasjoner.

Prosjektet vil i stor grad basere seg på eksisterende tilgjengelige måledata, men også identifisere nye måleparametere som kan bidra til å forbedre

planleggingsverktøyene.

Innsamlede operasjonsdata kombinert med definerte grenseverdier, objektive operasjonelle indikatorer og identifiserte farer, vil kunne benyttes som grunnlag for videre operabilitetsstudier og beslutningsstøtte for ulike fartøysoperasjoner på eksponerte lokaliteter.

Resultatene fra prosjektet vil bli demonstrert i et brukergrensesnitt basert på Anteos eksisterende programvareplattform.

Prosjektet vil bygge videre på resultater fra flere av forskningsområdene i SFI EXPOSED.



Innovasjonspotensiale:

- Demonstrere bruk av delvis automatisk datainnsamling for operasjonsplanlegging og beslutningsstøtte.

Assosierte prosjekter:

- Safety and risk management in exposed aquaculture operations, PhD-kandidat Ingunn M. Holmen, NTNU IMT.
- Methods and models for evaluating vessels and vessel operations in exposed aquaculture, PhD-kandidat Hans Tobias Slette, NTNU IMT.

Forskningsområde 3 – Konstruksjoner for eksponerte lokaliteter



Oversikt

Publikasjoner og rapporter

Kristiansen, D., V. Aksnes, B. Su, P. Lader, H. V. Bjelland (2017) *Environmental description in the design of fish farms at exposed locations*. Proceedings of the 36th Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference, OMAE2017-61531, June 25-30, 2017, Trondheim, Norway.

Lader, P., D. Kristiansen, M. Alver, H. V. Bjelland, D. Myrhaug (2017) *Classification of aquaculture locations in Norway with respect to wind-wave exposure*. Proceedings of the 36th Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference, OMAE2017-61659, June 25-30, 2017, Trondheim, Norway.

Bore, P. T., J. Amdahl (2017), *Modelling of hydrodynamic loads on aquaculture net cages by a modified Morison model*. Proceedings of the VII International Conference on Computational Methods in Marine Engineering, MARINE 2017, Nantes, France.

Bore, P. T., J. Amdahl. (2017), *Determination of environmental conditions relevant for the ultimate limit state at an exposed aquaculture location*. Proceedings of the 36th Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference, OMAE2017-61413, June 25-30, 2017, Trondheim, Norway.

Vilsen S.A., Sauder T., Sørensen A.J. (2017a), *Real-time hybrid model testing of moored floating structures using nonlinear finite element simulations*. Dynamics of Coupled Structures vol. 4, ch. 8.

Vilsen S.A., Føre M., Sørensen A.J. (2017b), *Numerical Models in Real-Time Hybrid Model Testing of Slender Marine Systems*. Proc. of the IEEE Oceans Conference 2017.

Vilsen S.A., Sauder T., Føre M., Sørensen A.J. (2018), *Controller Analysis in Real-Time Hybrid Model Testing of an Offshore Floating System*. Proc. of the ASME 37th International Conference on Ocean Offshore and Arctic Engineering (OMAE).

Bore, P. T., J. Amdahl, D. Kristiansen (2019). *Statistical modelling of extreme ocean current velocity profiles*. Ocean Engineering 186,

106055.

Vilsen S.A., Sauder T., Sørensen A.J., Føre M. (2019), *Method for Real-Time Hybrid Model Testing of ocean structures: Case study on horizontal mooring systems*. Ocean Engineering.

Vilsen S.A (2019) *Method for Real-Time Hybrid Model Testing of Ocean Structures Case Study on Slender Marine Systems*. Doctoral thesis at NTNU, 2018:166. ISBN 978-82-326-3930-4

Yu Z, Amdahl J, Kristiansen D, Bore PT, (2019) *Numerical analysis of local and global responses of an offshore fish farm subjected to ship impacts*. Ocean Engineering; Volume 194

Føre, H.M., Endresen, P.C., Norvik, C., Lader, P., 2020. *Hydrodynamic loads on net panels with different solidities*. Proceedings of the ASME 2020 39th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2020. August 3-7, 2020, Virtual, Online.

Slagstad, M., Bore, P.T., Amdahl, J. (2020). *Accuracy of simplified methods for fatigue damage estimation of exposed fish farms*. Proceedings of the ASME 2020 39th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2020. August 3-7, 2020, Virtual, Online.

Føre, H.M., Endresen, P.C., Norvik, C., Lader, P., 2021. *Hydrodynamic loads on net panels with different solidities*. ASME. J. Offshore Mech. Arct. Eng. October 2021; 143(5): 051901.

Føre, H.M., Endresen, P.C., Bjelland, H. V., 2021. *Load coefficients and dimensions of Raschel knitted netting materials in fish farms*. Proceedings of the ASME 2021 40th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2021. June 21-30, 2021, Virtual, Online.

Føre, H.M., Endresen, P. C., and Bjelland, H., 2022. *Load coefficients and dimensions of Raschel knitted netting materials in fish farms*. ASME. J. Offshore Mech. Arct. Eng. 144(4), 041301, <https://doi.org/10.1115/1.4053698>

Endresen, P.C., Føre, H.M., 2022. *Numerical modelling of drag and lift forces on aquaculture nets: Comparing new numerical load model with physical model test results*. Proceedings of the ASME 2022 41st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2022. June 5-10, 2022, Hamburg, Germany.

Føre, H.M., 2022. *Fra nyttår gjelder en ny teknisk standard i oppdrettsnæringa: Derfor gikk vi inn for skjerpede krav*. Kronikk i intrafish.no.

Presentasjoner og konferanser

H.M. Føre*, P.C. Endresen, G. Eidnes, M. Bondø, C. Norvik, A. Tsarau, D. Kristiansen and H.V. Bjelland (2019). *Hydrodynamic loads on exposed fish farms*. Aquaculture Europe, October 7-10, Berlin, Germany.

Moe Føre, H., Thorvaldsen, T., Osmundsen, T.C., Asche, F., Tveterås, R., Fagertun, J.T., Bjelland, H.V., 2022. *Innovative fish farm designs in Norwegian salmon farming*. Aquaculture Europe 2022 Conference and Exposition, September 27-30, Rimini, Italy.

Masteroppgaver og avhandlinger

Bore, P. T. (In prep.), *Structural design of reliable offshore aquaculture structures*. PhD-thesis. Department of Marine Technology, NTNU.

Williams, D. H. (2017), *Green-water phenomena for feed barges in exposed sea areas*. Department of Marine Technology, NTNU.

Zang, Y. (2018), *Experimental and Numerical Investigations of Global Motions and Slamming Loads on an Aquaculture Feed Barge*. Department of Marine Technology, NTNU.



Strukturell design av eksponerte havbrukskonstruksjoner

VEILEDERE

Professor [Jørgen Amdahl](#) (NTNU)
Seniorforsker [David Kristiansen](#) (SINTEF Ocean)

PERIODE

Q4 2015 – Q4 2018

Utforming og dimensjonering av havbrukskonstruksjoner mot ekstreme miljølaster er essensielt når med eksponerte lokaliteter tas i bruk. Denne avhandlingen ser på nettopp dette, med spesielt fokus på bølger og strøm.

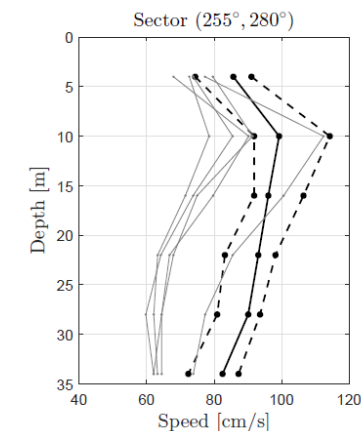
For tradisjonelle merder er laster på not typisk den dominerende lastfaktoren. For å regne ut de viskøse kreftene på nettet brukes som regel to metoder: (1) Panelmodeller, og (2) Morisonmodeller. Kraftkoeffisienter fra forsøk med nettpaneller blir generelt presentert som 'panelkoeffisienter', men kommersielle analyseverktøy er ofte begrenset til Morisonmodeller. I [1] presenteres en modifisert Morisonmodell som baserer seg på å konvertere 'panelkoeffisienter' til retningsavhengige Morisonkoeffisienter. Modellen gir god overensstemmelse med panelmodeller og forbedrede resultater sammenlignet med den klassiske Morisonmodellen.

Relativt enkle statistiske metoder for å

fastsette ekstreme miljøforhold (bølger vind og strøm) på eksponerte havbruksanlegg blir presentert i [2]. Spesielt fokus er på bølger, og retningsavhengighet er funnet viktig å ta hensyn til når ekstreme sjøtilstander estimeres (H_s og T_p).

Kunnskap om formen på ekstreme vertikale strømprofiler er viktig for design av marine konstruksjoner. I [3] blir en statistisk metode for felles modellering av vertikale strømhastighetsprofiler presentert. Metoden er testen ved bruk av bøyedata (ADCP) fra to kystnære lokaliteter i Norge (Munskjæra og Salatskjæra).

Virkningen (i form av strukturell respons) av de ulike miljølastene skal undersøkes videre.



Artikler:

- [1] Bore, P. T., J. Amdahl (2017), *Modelling of hydrodynamic loads on aquaculture net cages by a modified Morison model*. Proceedings of the VII International Conference on Computational Methods in Marine Engineering, MARINE 2017, Nantes, France.
- [2] Bore, P. T., J. Amdahl. (2017), *Determination of environmental conditions relevant for the ultimate limit state at an exposed aquaculture location*. Proceedings of the 36th Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference, OMAE2017-61413, June 25-30, 2017, Trondheim, Norway.
- [3] Bore, P. T., J. Amdahl, D. Kristiansen (2019). *Statistical modelling of extreme ocean current velocity profiles*. Ocean Engineering 186, 106055.

Lukkede oppdrettsanlegg i bølger og strøm

VEILEDERE

Professor [Pål Lader](#) (NTNU)
 Førsteamanuensis [David Kristiansen](#) (NTNU)
 Professor [Trygve Kristiansen](#) (NTNU)
 Professor [Bjørn Egil Asbjørnslett](#) (NTNU)

PERIODE

Q4 2018 – Q4 2022

Motivasjonen til studiet er å skaffe grunnleggende kunnskap om design av trygge og pålitelige lukkede oppdrettsanlegg med god fiskevelferd. Studiet vil fokusere på merder i fleksible materialer (som presenning) hvor koblingen mellom struktur og hydrodynamikk vil være av betydning.

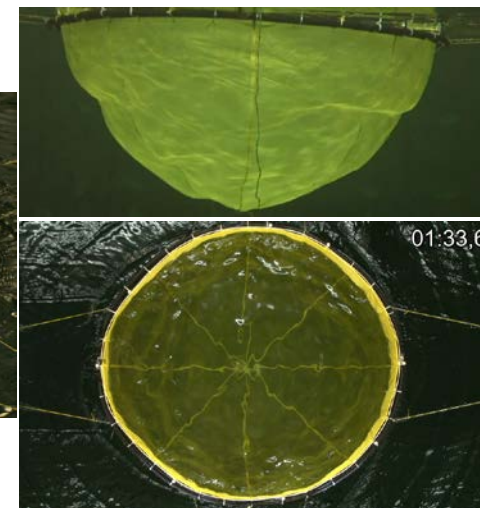
Bruken av konvensjonelle, åpne merder gir flere utfordringer for den norske havbruksnæringen, f.eks. lus, rømming, forurensning og utslipp. Flere konsepter har blitt foreslått av forskere og teknologileverandører, blant dem er lukkede oppdrettsanlegg.

Fra et hydrodynamisk perspektiv kan fluid-struktur-interaksjon av lukkede merder kategoriseres etter merdens strukturegenskaper, dvs. om materialet regnes som stivt, halvflexibelt eller fleksibelt.

Målet med studiet er å undersøke responsen til fleksible lukkede merder i bølger og strøm ved hjelp av eksperimentelle og numeriske metoder.

Flere problemstillinger har blitt identifisert for å nå målet:

1. Studie av merdens respons på miljøbelastninger, sloshing og hydroelastitet.
2. Studie av belastning på membranen ved hjelp av eksperimentell metode. Spenning ved membranbunn og forbindelsen mellom membranen og flytekragen er av interesse.
3. Sammenligne bølgeresponstestresultater med numeriske resultater. Den numeriske analysen vil bli gjort ved å bruke (linær) "Generalized modes" metode i WAMIT.



Status og videre arbeid:

- Fra [1] ble koblingen mellom merdens fleksibilitet og bevegelser funnet å være signifikant. Neste trinn vil være å inkludere de fleksible membranmodusene til numerisk modell.
- Fra [2] ble det funnet at det ikke er mulig å gjøre todimensjonale eksperimentelle studier på membranmateriale. Membran reagerer tredimensjonalt selv med todimensjonale ytre belastninger. Feilkilder relatert til viskøs kraft i det eksperimentelle oppsettet ble funnet til å være signifikant.
- To sett med modelltester er planlagt utført i august og oktober 2022. Fokus vil være på merdrespons og belastning på membranen. Ikke-påtrengende metode for måling av membrandeforvasjon og spenning vil bli brukt.

Resultater:

[1] Mukhlas, M.; Lader, P.F.; Kristiansen, D.; Kristiansen, T. (2021). *Bag and floater motions of a fabric membrane cage*. J. Fluids Struct., 106 (2021), Article 103353.

[2] Mukhlas, M.; Kristiansen, T. ; Lader, P.F.; Kristiansen, D. (in review). *Experimental and Numerical Investigation of a Vertical Pre-tensioned Membrane Sheet in Regular Waves*. The 9th International Conference on Hydroelasticity in Marine Technology, Rome, Italy.

Metode for sanntid hybridmodelltesting av marine konstruksjoner

VEILEDERE

Professor [Asgeir Sørensen](#) (NTNU)
Førsteamanuensis [Martin Føre](#) (NTNU)
Professor [Arne Fredheim](#) (NTNU/SINTEF Ocean)

PERIODE

Q1 2014 – Q2 2018
Disputert 24.05.2019

Sanntid hybridmodelltesting, eller Real-Time Hybrid Model testing (ReaTHM[®] testing), er en metode hvor tradisjonelle hydrodynamiske modellforsøk blir sammenkoplet med numerisk simulering av konstruksjoner i sanntid.

Marine konstruksjoner er dynamiske systemer med påvirkning fra mange ulike fysiske fenomener. Kompleks hydrodynamikk rundt bølgebelastning og viskøs strømming gjennom og nettstrukturer vanskeliggjør design, og at garantere sikkerheten til konstruksjonen. Det blir derfor ofte gjennomført hydrodynamiske modellforsøk som ledd i design validering av marine konstruksjoner.

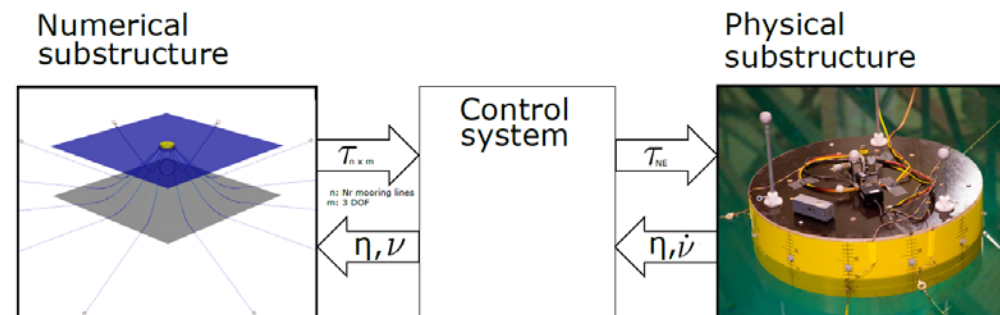
Utvikling av nye typer havbruksanlegg på eksponerte dypvanns lokasjoner medfører at komplekse konstruksjoner nær fri overflate må sammenkoples med forankringssystemer på dypt vann. Dette gir utfordringer i gjennomføring av modellforsøk, på grunn av plassbegrensninger med dagens

laboratorieinfrastruktur.

En løsning er å anvende hybride modellforsøk, hvor konstruksjonen oppdeles i fysiske og numerisk deler, som blir koplet sammen i sanntid gjennom et grensesnitt med kontrollsystem, aktuatorer og sensorer.

I dette prosjektet har det blitt utviklet et generisk system (Figur), hvor en ikke lineær *finite element* modell har blitt sammenkoplet med et hydrodynamisk modellforsøk.

Basert på erfaring er fra utvikling av kontrollsystem og test oppsett, har det blitt fremsatt et forslag til en generell metode for design og gjennomføring av hybride modellforsøk av marine konstruksjoner.



Figur: Fysisk modell av sylindrebøye sammenkoplet med numerisk modell av forankringssystem gjennom et kontrollsystem grensesnitt.

Artikler:

Vilsen S.A., Sauder T., Sørensen A.J. (2017a), *Real-time hybrid model testing of moored floating structures using nonlinear finite element simulations*. Dynamics of Coupled Structures vol. 4, ch. 8.

Vilsen S.A., Føre M., Sørensen A.J. (2017b), *Numerical Models in Real-Time Hybrid Model Testing of Slender Marine Systems*. Proc. of the IEEE Oceans Conference 2017.

Vilsen S.A., Sauder T., Føre M., Sørensen A.J. (2018), *Controller Analysis in Real-Time Hybrid Model Testing of an Offshore Floating System*. Proc. of the ASME 37th International Conference on Ocean Offshore and Arctic Engineering (OMAЕ).

Vilsen S.A., Sauder T., Sørensen A.J., Føre M. (2019), *Method for Real-Time Hybrid Model Testing of ocean structures: Case study on horizontal mooring systems*. Ocean Engineering.

Vilsen S.A (2019) *Method for Real-Time Hybrid Model Testing of Ocean Structures Case Study on Slender Marine Systems*. Doctoral thesis at NTNU, 2018:166. ISBN 978-82-326-3930-4

Avansert og rasjonell analyse av oppdrettsanlegg i stål for eksponerte farvann

VEILEDERE

Professor [Jørgen Amdahl](#) (NTNU)
Førsteamanuensis [David Kristiansen](#) (NTNU)

PERIODE

Q4 2019 – Q4 2023

Dette doktorgradsarbeidet fokuserer på å utvikle og verifisere trygge og rasjonelle metoder for å dimensjonere havbruksanlegg. Nye havbruksanlegg er ofte utformet annerledes og plassert i et mer eksponert miljø enn tidligere. For å sikre miljø og helse er det essensielt at vi er trygge på at beregningsmetodene gir sikre konstruksjoner for nye havbruksanlegg.

Havbruksnæringen beveger seg fra beskyttede lokaliteter til mer eksponerte områder. For nye design på mer eksponerte lokaliteter er ikke de tradisjonelle metodene gode nok. Konstruksjonene er ofte annerledes enn de tradisjonelle. I tillegg vil også miljøbelastningen være mer bølgedrevet enn tidligere. Ofte har regler og metoder fra olje- og gassindustrien blitt tatt i bruk, men disse metodene er heller ikke utviklet med tanke på eksponerte havbrukskonstruksjoner.

Målet med arbeidet er å utvikle rasjonelle metoder for avansert design av havbrukskonstruksjoner ved å bruke fundamentale metoder for laster, lasteffekter og kapasitetsvurderinger. I tillegg er det ønskelig at det utvikles forenklete metoder for designverifikasjon.



Artikler:

Slagstad, M., Bore, P.T., Amdahl, J. (2020). *Accuracy of simplified methods for fatigue damage estimation of exposed fish farms*. Proceedings of the ASME 2020 39th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2020. August 3-7, 2020, Virtual, Online.

PROSJEKTLEDER

David Kristiansen (SINTEF Ocean)

PARTNERE INVOLVERT

SINTEF Ocean, NTNU IMT, AQS, LEROW, Kongsberg SEATEX, SalMar, DNV.

PERIODE

Q1 2015 – Q4 2018

TYPE FORSKNING

Industriell/Grunnleggende

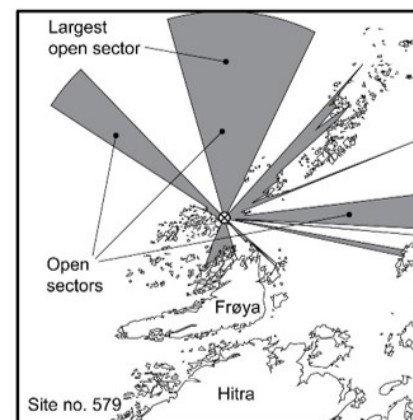
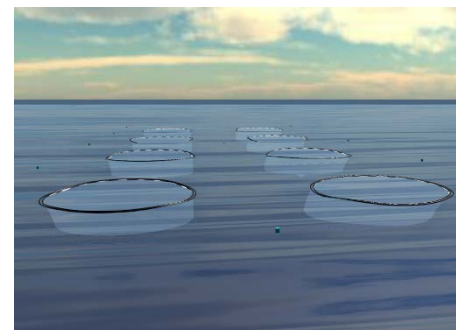
Dette prosjektet omhandler utvikling av kunnskap og metodikk for design og analyse av pålitelige havbrukskonstruksjoner for operasjon på eksponerte lokaliteter.

Fiskeoppdrett på eksponerte lokaliteter krever robuste og pålitelige konstruksjoner for bærekraftig, sikker og effektiv produksjon. Dette prosjektet tar utgangspunkt i dagens konvensjonelle oppdrettsanlegg og ser på hvilke utfordringer som møter dagens teknologi for merder, fortøyningsystemer og fôrlektene møte ved bruk på mer eksponerte lokaliteter.

Studiet tar for seg ulike faser av dagens designprosess og metoder, med fokus på å kartlegge usikkerheter og hvordan disse forplanter seg i designprosessen. Dette inkluderer gjennomgang av metoder for beskrivelse av miljøforhold på lokalitet og estimering av

designkondisjoner, metoder for beregning av last og respons av hovedkomponenter, og metodikk for koblet analyse av hele merdanlegg.

Prosjektet søker å utvikle ny kunnskap om kritiske problemområder knyttet til økt eksponering, og forbedrede metoder for design, simulering og analyse av oppdrettsanlegg for eksponerte lokaliteter. Målet er å bidra til utviklingen av sikre og operasjonelle havbruksanlegg for eksponert akvakultur.



Resultater:

- Gjennomgang av metodikk for miljøbeskrivelse i kystzone, inkludert analyse av bølgeeksponering ved strøklengdeanalyse, analyse av bøyedata og. Retningsavhengighet viktig.
- Fokus på bølge- og strømmålinger og usikkerhet knyttet til estimering av designkondisjoner fra ekstremverdistatistikk.
- Simulerte strømdata fra Trøndelag for perioden 2012 til og med 2016 med programvaren SINMOD, for etablering av langtidsstatistikk.
- Utviklet helhetlig beregningsmodell for tidssimulering av merdanlegg
- Fortøyningsanalyse av komplett merdanlegg med eksponering fra strøm og irregulær sjø.

Innovasjonspotensiale:

- Forbedret metodikk for beskrivelse av miljø ved design av havbrukskonstruksjoner.

Assosierte prosjekter:

- Sikrere operasjoner og arbeidsplasser i havbruk, 2016-2019

Miljøforhold og fortøyningskrefter

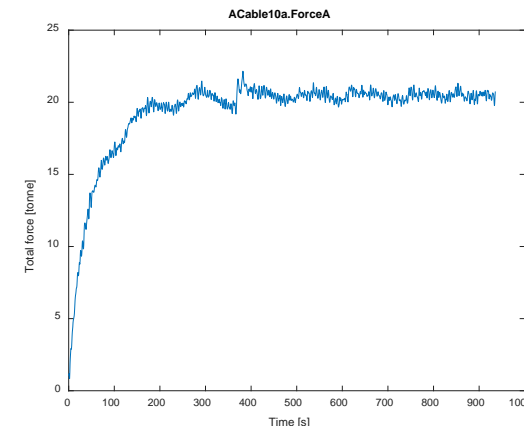
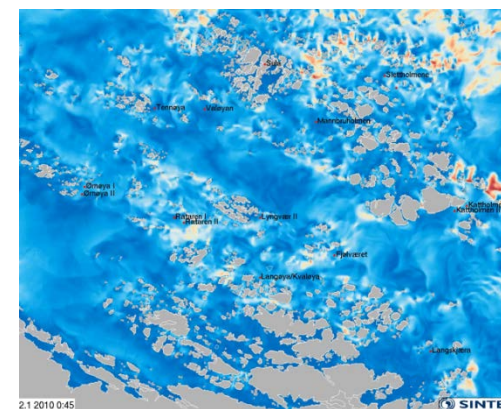
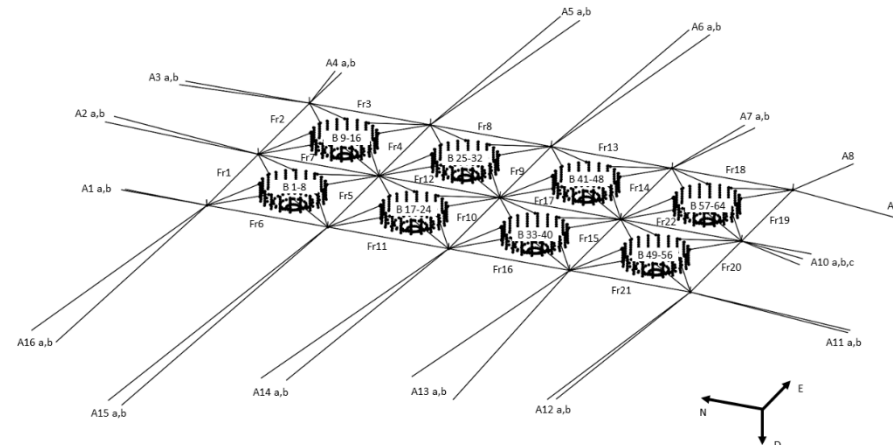
Dagens tekniske standard for havbruksanlegg setter krav til gjennomføring av fortøyningsanalyse for å vurdere systemets ytelse og risiko for havari. I dette prosjektet er det fokusert på kvalitet av dagens metoder og modeller som fortøyningsanalysen baserer seg på.

Representativ beskrivelse av miljøforhold på lokalitet er viktig som underlag for design av sikre oppdrettsanlegg. I dette prosjektet har fokus vært på spesielle utfordringer knyttet til miljøbeskrivelse for eksponert kystzone. Bruk av måledata til estimering av miljøforhold på lokalitet ved design har blitt analysert. Ved å splitte 16 år med måledata av bølger i tidsserier med ett års varighet, viser analysen at estimat basert på ett-års måletidsserier kan føre til betydelig underestimering av ekstremverdier tilsvarende 50 års returperiode. Tilsvarende viser analyse av måledata for strøm at dagens praksis med måling av strøm i én måned gir svært usikre estimat av 50-års strømkondisjon.

Lastmodeller for hovedkomponenter til konvensjonelle merdanlegg er gjennomgått og simuleringsmodeller av komponenter er satt sammen til en tidssimuleringsmodell for et helt merdanlegg med åtte merder, i simuleringsprogramvaren FhSim. Denne modellen er så brukt til å studere fortøyningskrefter på anlegget under påvirkning fra bølger og fra strøm, hver for seg og i kombinasjon. For realistiske verdier av bølge- og strømforhold, så gir strøm det absolutt største bidraget til fortøyningskreftene. Simuleringsresultatene viser at de maksimale fortøyningskreftene på grunn av en strøm på 0,5 m/s er

signifikant høyere enn de som skyldes moderate bølger en sjøtilstand definert ved JONSWAP-spekter med signifikant bølgehøyde lik 3m og midlere bølgeperiode lik 6s (22,1 tonn vs. 2,8 tonn). Det samme gjelder for lastene i rammetau og haneføtter. Fortøyningslinjer og rammetau som opplever størst belastning er lokalisert oppstrøms i anlegget. Dette kan være delvis på grunn av skyggeeffekter bak merdene som reduserer innstrømningen og dermed belastningen på merder nedstrøms i anlegget. Simuleringer av merdanlegg i bølger og strøm viser at simulerte tidsserier må tilsvare minst 15 minutter i fullskala for å nå stabile forhold. Videre er det hydrodynamisk lastmodell for not som har størst påvirkning på resulterende last i fortøyning.

Prosjektet har finansiert ett phd-stipend til student Pål Takle Bore, som har sett på designkriterier for havbrukskonstruksjoner ved design basert på grensetilstander. Spesielt fokus har vært på estimat og beskrivelser av dimensjonerende strømforhold. En metodikk basert på harmonisk analyse og ekstremverdistatistikk på målte strømdata er utviklet, som kan brukes til å finne statistisk representative vertikale strømprofiler med gitt sannsynlighetsnivå (f.eks. 50 års returperiode).



PROSJEKTLEDER

Heidi Moe Føre (SINTEF Ocean)

PARTNERE INVOLVERT

Aqualine, Salmar, AQS, LEROW, Kongsberg SEATEX, SINTEF Ocean, DNV, NTNU

PERIODE

Q1 2019 – Q4 2019

TYPE FORSKNING

Grunnleggende

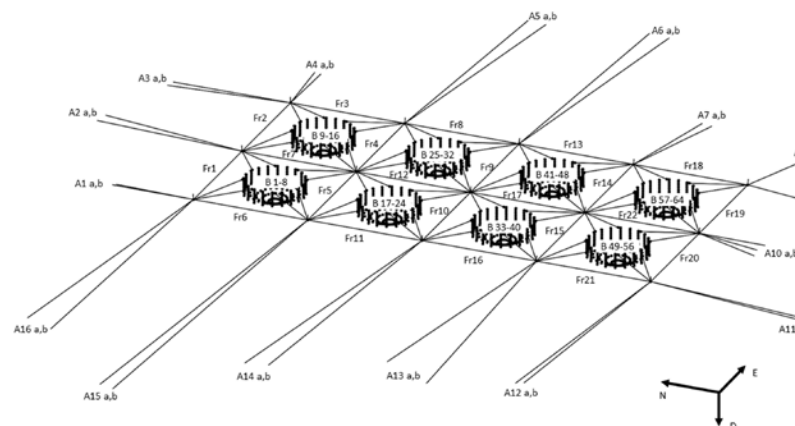
P15 hadde som mål å bidra til økt presisjon i strukturell analyse av oppdrettsanlegg ved å arbeide mot mer presise lastmodeller og analysemetoder. Dette kan på bidra til å redusere risiko for havari og rømming, samt bidra til å øke sikkerhet for personell.

Til og med 2018 har det i Fo3 vært fokusert på å øke kvaliteten på input til styrkeberegninger av oppdrettsanlegg, inkludert dimensjonerende miljølaste og dimensjoner til notlin. Mer presise designverdier krever også tilsvarende økt presisjon i lastmodeller, og det er derfor på tide å etablere mer presise lastmodeller.

Et naturlig fokus er oppdrettsnøter, som står for det største lastbidraget på oppdrettsanlegg gjennom dragkrefter fra strøm og bølger. Formler for beregning av dragkrefter på notlin ble etablert for ca. 30 år siden, og det er nå behov for å

justere disse i forhold til dagens og framtidens not-materialer, samt nye og mer presise metoder for måling av soliditet. I 2019 vil det bli gjennomført slepeforsøk som vil danne basis for nye lastmodeller.

Målet er å utvikle forbedrede lastmodeller for konvensjonelle notmaterialer, implementere disse i software og sammenligne med eksisterende modeller. Det legges vekt på god dokumentasjon av soliditet ved bruk av forskjellige metoder.



Innovasjonspotensiale:

- Sikker og optimalisert oppdrettsteknologi
- Programvareutvikling



Dragkrefter på not

Dragkrefter på not er ofte den største belastningen på oppdrettsanlegg. Slike krefter oppstår når oppdrettsanlegg utsettes for strøm og bølger. Dragkrefter er avhengig av vannmotstanden til notlin som kan finnes ved hjelp av slepeforsøk.

I mai 2019 ble det gjennomført en serie slepetester med notlinpaneler i skipsmodelltanken på Tyholt i Trondheim. Målet var å etablere et nytt datasett for drag-krefter på not fra strøm og bølger.

Fire ulike notlin ble slept med en hastighet opp til 2 m/s. Notlinet som ble testet hadde soliditet mellom 0.15 og 0.32. (Soliditet ble funnet som to ganger trådtykkelsen delt på maskesiden.) De fleste kommersielle notlin befinner seg i dette intervallet.

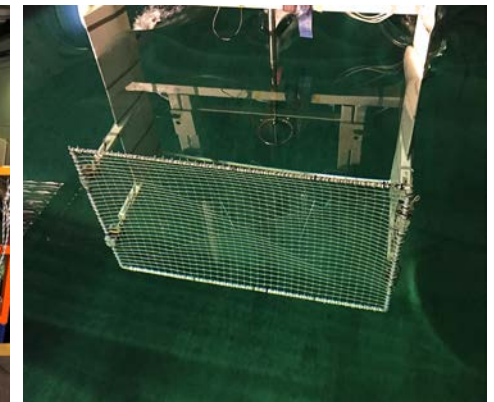
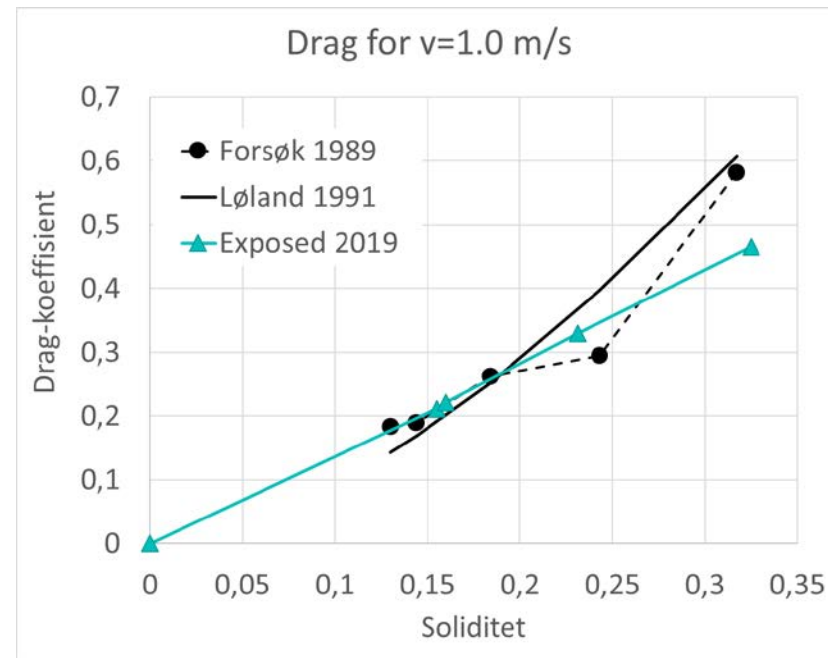
Krefter på notlinpanelet ble målt i forsøket, og basert på disse målingene ble vannmotstanden til notlinet funnet (gitt som drag-koeffisienten). Den er gitt i figuren øverst til høyre for vertikale panel slept med en hastighet på 1.0 m/s.

Resultatene indikerer at vannmotstanden øker proporsjonalt med soliditeten til notlinet.

Figuren sammenligner våre funn med tidligere tester. Dette indikerer at tester med dagens notlinmaterialer og nøyaktige soliditetsmålinger gir en lavere vannmotstand for relativt høye soliditeter.

Slepetestene viser videre at for hastigheter fra 0.5 m/s og oppover til 2 m/s er dragkoeffisienten tilnærmet konstant for en gitt soliditet, og at dragkreftene øker proporsjonalt med hastigheten i andre.

Resultatene fra forsøkene er publisert i [1] og [2]. Dette inkluderer også lastkoeffisienter for skråstilte panel. I tillegg publiseres hastighetsreduksjon basert på målt relativ hastighet i bakkant av panelene under slep.



[1] Føre, H.M., Endresen, P.C., Norvik, C., Lader, P., 2020. *Hydrodynamic loads on net panels with different solidities*. Proceedings of the ASME 2020 39th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2020. August 3-7, 2020, Virtual, Online.

[2] Føre, H.M., Endresen, P.C., Norvik, C., Lader, P., 2021. *Hydrodynamic loads on net panels with different solidities*. ASME. J. Offshore Mech. Arct. Eng. October 2021; 143(5): 051901.

PROSJEKTLEDER

Heidi Moe Føre (SINTEF Ocean)

PARTNERE INVOLVERT

Aqualine, DNV, NTNU, Salmar, Mowi, Cermaq, AQS, Kongsberg, SINTEF Ocean

PERIODE

Q1 2020 – Q4 2022

TYPE FORSKNING

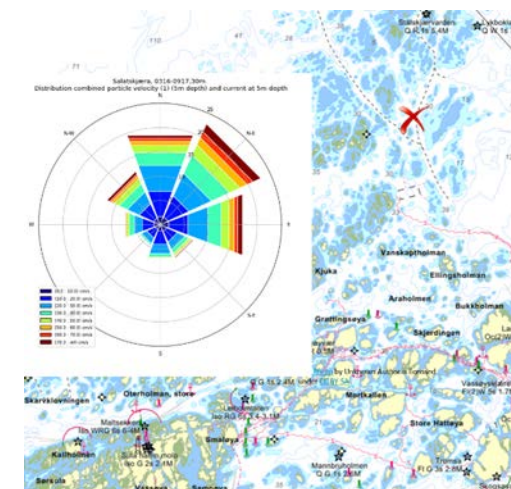
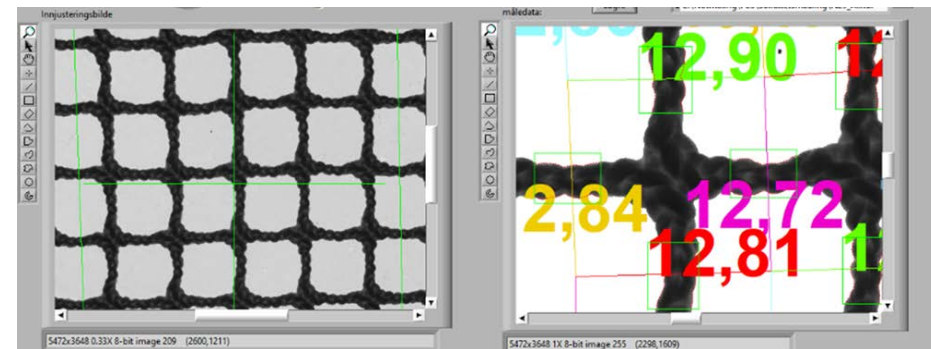
Grunnleggende

Fo3 har som mål å bidra til økt kunnskap om beregning av hydrodynamiske krefter på anlegg, samt å definere og kvantifisere eksponeringsgrad

De siste tre årene av SFI EXPOSED vil Fo3 ha som mål å utvikle og validere ny numerisk lastmodell for drag-krefter på oppdrettsnøter. I 2019 og 2020 er det gjennomført slepetester med i alt 8 forskjellige notlin som danner grunnlag for lastmodellen. Dette arbeidet har tydeliggjort at det er viktig å etablere objektive metoder for måling av soliditet, og at lokal geometri til notlinet kan ha stor betydning for krefter som virker på havbrukskonstruksjoner. Dette blir en del av arbeidet i Fo3 framover.

Eksponeringsgrad er igjen satt på dagsorden, og Fo3 vil søke å definere eksponeringsgrad og utvikle metoder som kan benyttes

for å kvantifisere eksponeringsgraden til en gitt lokalitet. Dette kan være nyttige verktøy både for myndigheter som skal regulere oppdrettsvirksomhet, men også for aktører som skal drifte eksponerte lokaliteter. Både ekstreme forhold og operasjonelle forhold vil bli belyst.



Lastmodell og soliditet til not

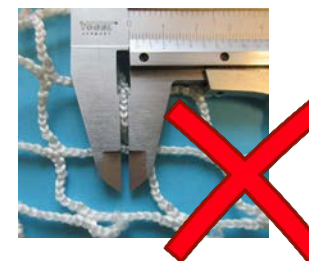
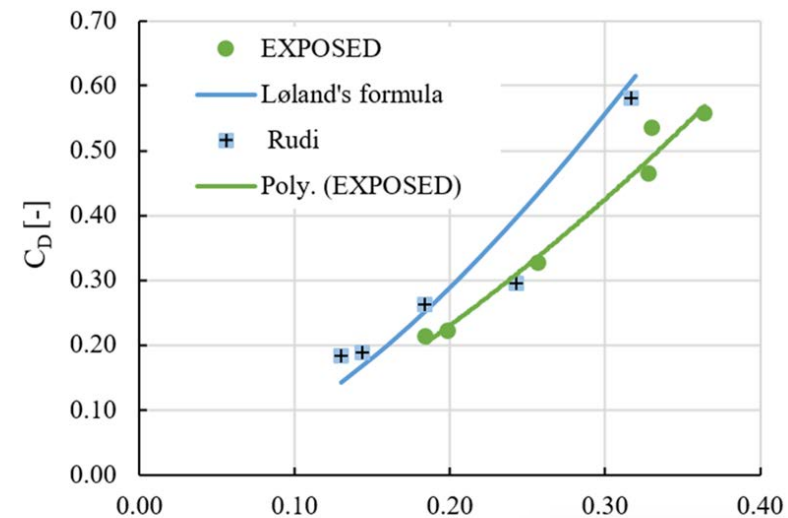
En ny lastmodell for drag- og løft-krefter på not er formulert. Den kan brukes i beregning av belastninger på nøter fra strøm og bølger. Modellen gir lastkoeffisienter som funksjon av soliditet funnet ved bildebehandling.

I 2020 ble det gjennomført en serie slepetester med notlinpanel i skipsmodell-tanken på Tyholt i Trondheim. Testene supplerte resultater fra P15 (2019), og inkluderte to notlin med høy soliditet og to notlin i modell-skala (finmasket notlin).

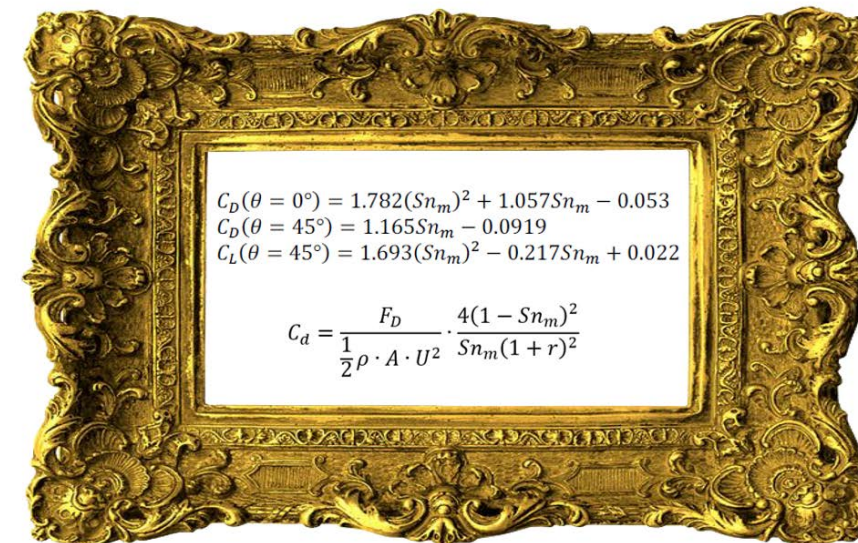
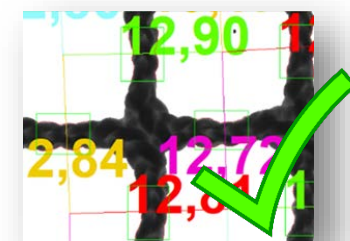
Det har blitt utviklet et formelverk som gir sammenheng mellom vannmotstand (lastkoeffisienter $C_{D,L}$) og soliditeten til notlinet. I denne prosessen ble det tydelig at soliditet målt med bildebehandling (Sn_m) ga mer presise sammenhenger enn estimat basert på manuelle målinger av trådtykkelse og maskeside (Sn_e). Presise soliditetsmålinger er en viktig forutsetning for gode lastberegninger for nøter, anlegg og forankring.

Når man måler soliditeten med bildebehandling inkluderer man også ekstra materiale i knutene, og for de åtte notlinpanelene i slepetestene var Sn_m mellom 2-27% høyere enn Sn_e (for notlin brukt i kommersielle nøter var forskjellen 13-27%). Presise soliditetsmålinger anses som hovedårsaken til at de nye lastkoeffisientene er lavere enn i sammenlignbare gamle data.

De kombinerte resultatene fra 2019 og 2020 gir ikke lenger et lineært forhold mellom drag-koeffisienten og soliditet, men indikerer at oppbremsing av strømmingen gjennom notlinet (r) også kan påvirke vannmotstanden.



Sn_m [-]



Krefter på not – numerisk modellering

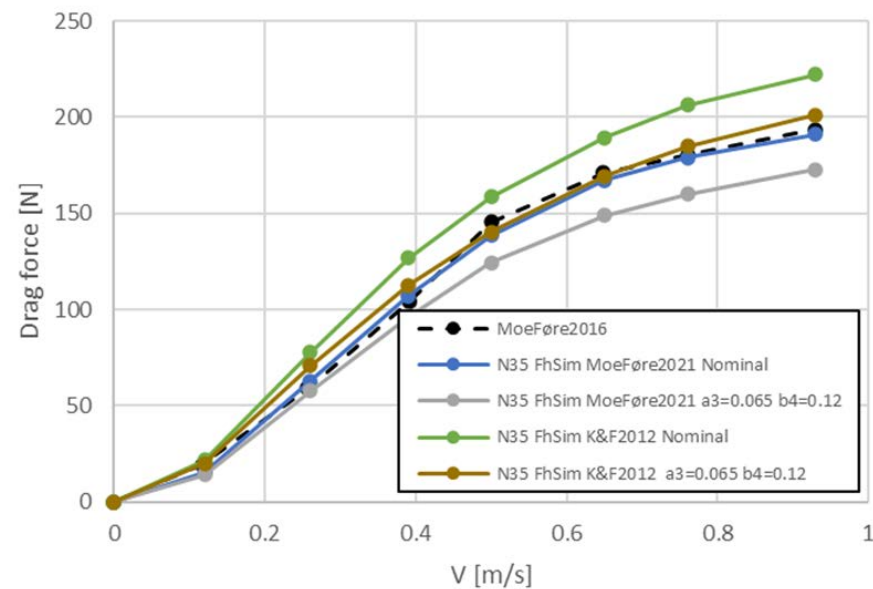
Den nye lastmodellen vi har utviklet for drag- og løft-krefter på not har blitt implementert i et numerisk simuleringstøytøy. Vi har testet den ut og sammenlignet den med andre modeller og resultater fra fysiske modellforsøk.

Den nye lastmodellen er implementert i analyseverktøyet FhSim, slik at vi kan teste den ut og sammenligne den med andre modeller og resultater fra modellforsøk. Modellforsøkene vi har sammenlignet med er en serie med tester av forenklete not-modeller bestående av notlin-sylindre. Sylinderne var plassert i en konstant strøm med hastighet opp til 0.93 m/s.

Det er gjennomført en parameterstudie med varierende forhold mellom drag og løft, og avhengig av notlinets vinkel i forhold til strømrretningen. Resultater fra dette vises i den nederste figuren til høyre, og indikerer at lastmodellen som er basert på resultat fra panel-tester med varierende vinkel (grå kurve) bør justeres for å ta hensyn til at panel og notmodell kan påvirke strømrretningen i forskjellig grad (blå klurve).

Figuren øverst til høyre viser at den numeriske analysen (rødt rutenett) klarer å gjenskape fasongen til den fysiske not-modellen. Drag-kreftene som beregnes stemmer også godt overens med målte krefter (den blå kurven). Særlig for høyeste soliditetene (tilsvarende notlin med påslag i soliditet fra marin begroing) oppnås svært god match. Resulterende løft-krefter er ikke like entydige, hverken i tester av notsylinde eller notpanel. Både variasjoner i lokal geometri til notlinet og måletekniske utfordringer i modellforsøk kan tenkes å påvirke løft, og her er det sammenhenger som ikke er fullt ut forstått.

Resultatene fra forsøkene blir publisert i en vitenskapelig artikkel i forbindelse med OMAE 2022.



Eksponeringsgrad

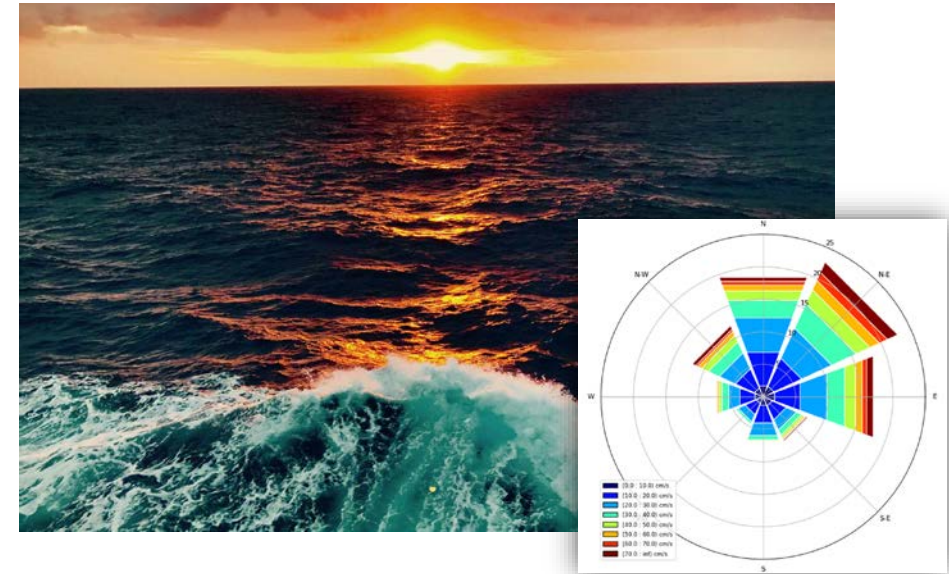
Dagens norske oppdrettsanlegg for fisk ligger innaskjærs og er i begrenset grad eksponert for høye bølger, sterk strøm og vind. Når man nå ser mot havbruk til havs står man ovenfor den fulle bredden og styrken til Nord-atlanteren, og eksponering på et annen nivå enn før. Vi har foreslått en måte å tallfeste eksponeringsgraden til disse oppdrettslokalitetene på.

Bølgehøyde og strømhastighet på en lokalitet endrer seg hele tiden, så det å beskrive sjøtilstand og strøm på en lokalitet med ett enkelt tall er egentlig en umulig oppgave. Men med et overordnet blikk, foreslår vi likevel en metode som vi mener gir en meningsfull klassifisering av eksponeringsgrad.

Vi foreslår at man beregner en eksponeringshastighet som reflekterer et estimat på ekstrem horisontal vannhastighet (fra bølger og strøm) til en gitt lokalitet for et vanddyp på 10 m. Eksponerings-hastigheten bør beregnes for minst åtte himmelretninger, og for 10- og 50-års returperioder ekstreme bølger og strøm, og kan presenteres i et roseplott.

Basert på praktiske erfaringer med hvilke typer lokaliteter som oppleves mer og mindre eksponert, er det foreslått eksponeringsgrad fra E0 (skjermet) til E4 (ekstremt eksponert).

Eksponerings-grad	Eksponerings-hastighet	Type lokalitet
E0	< 0.7 m/s	Skjermet
E1	0.7 - 1.5 m/s	Delvis skjermet
E2	> 1.5 m/s	Eksponert
E3	> 2.5 m/s	Eksponert
E4	> 3.5 m/s	Ekstremt eksponert



Type lokalitet	Skjermet	Fjord	"På grensa?"	«Offshore»	Til havs
Strømhastighet (m/s)	0,5	1	1	1,2	1
Signifikant bølgehøyde (m)	1	2,5	4	7	14
Bølge pikperiode (s)	4	6	7	7	16
Bølgelengde (m)	25	56	77	77	400
Eksponerings-hastighet(m/s):					
Hastighet vannoverflate	1,3	2,3	2,8	4,3	3,4
Hastighet -5 m	0,7	1,7	2,2	3,3	3,2
Hastighet -10 m	0,6	1,4	1,8	2,6	3,0
Hastighet -30 m	0,5	1,0	1,2	1,5	2,4

Eksempler på ulike havbrukslokaliteter

Skalering av notlin

Skalerte modellforsøk er et viktig hjelpemiddel for å forstå hvordan oppdrettsanlegg vil oppføre seg når det utsettes for strøm og bølger, og hvor store belastninger det må tåle. Men hvordan nedskaleres man notlin med en tråddykkelse på et par millimeter?

Én løsning som ofte benyttes kan være å bruke fullskala notlin, og med det anta at last og respons kun er avhengig av soliditeten til notlinet. Men i tilfeller der nedskalering vurderes som riktig og viktig, har man i praksis mulighet til å bruke modell-notlin med en tråddykkelse på ca 0,7 mm. Men hvordan kan skalering påvirke drag-kreftene som virker på notmodellen? Det har vi søkt å få mer kunnskap om gjennom forsøk med seks forskjellige notsylindere i SINTEF sin flumetank.

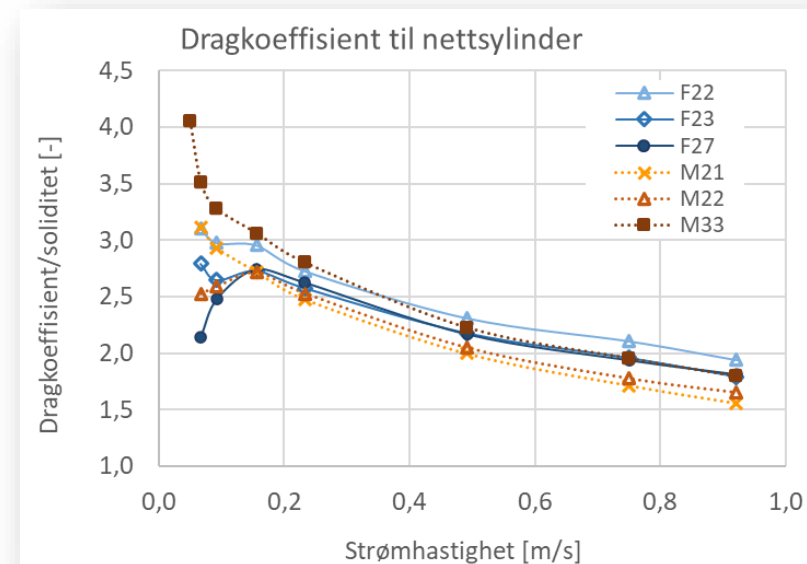
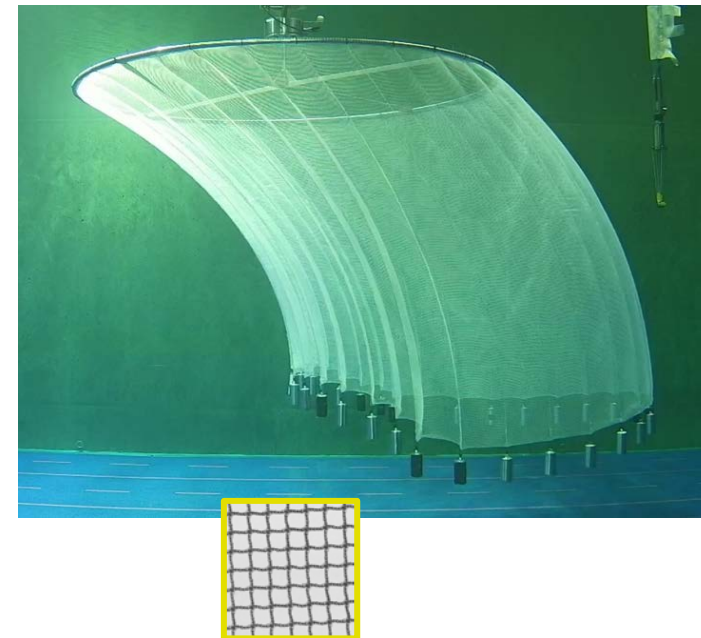
Dersom man antar at en notlinetråd oppfører seg som en glatt, sirkulær sylinder, vil man i teorien kunne forvente en betydelig økning i dragkoeffisienten (vannmotstanden) til en notlinetråd når denne er skalert, særlig for lav strømningshastighet (Reynolds tall). Dette har vært arbeidshypotesen til dette forsøket.

Vi observerte at sylindere med skalert notlin oppfører seg litt annerledes enn de med fullskala notlin (bunnen forskyves 5-10% mindre). Dragkraft fra strøm var ca 10% høyere for

fullskala nøter sammenlignet med modellskala nøter med samme soliditet for strømhastigheter over 0,15 m/s, mens forskjell i løftkrefter var enda høyere. For lavere hastighet var ikke resultatene like entydige, og i noen tilfeller var kreftene høyere på skalert notlin.

Dermed er ikke arbeidshypotesen fullt ut bekreftet, noe som indikerer at strømnings- og krefter er mindre påvirket av tråddykkelsen enn man kunne tenke seg. Kanskje nøter oppfører seg mer som en porøs sylinder enn en samling av slanke tråder? Det vil si at vannmotstanden i hovedsak er avhengig av soliditeten og fasongen til nettet, i alle fall hvis vi ser bort fra de laveste hastighetene.

Hvorfor skalert notlin har en noe redusert vannmotstand er foreløpig et åpent spørsmål. Men det kan muligens være påvirket av lokal geometri (strikkestruktur). Kanskje de i praksis har en lavere ruhet?



Forskningsområde 4 – Fartøysdesign for eksponerte operasjoner

Fartøysdesign for eksponerte operasjoner

Utfordringer

Designe fartøy, utstyr og logistikk-løsninger som muliggjør sikker og effektiv operasjon i fjerntliggende og eksponerte områder.

Forskningsoppgaver

Sjøgangsegenskaper: Fartøy er et kritisk element i nesten all moderne havbruk. Det deles gjerne inn i tre hovedtyper fartøy; servicefartøy, brønnbåter og fôr-båter. Alle disse fartøystypene vil få endrede krav til funksjon og operasjon når havbruksnæringen utnytter områder med større miljøkrefter. Operasjon av fartøy i eksponerte områder forutsetter fartøysdesign med forbedrede sjøgangsegenskaper enn dagens havbruksnæring krever for at arbeidsoppgaver skal bli trygt og effektivt utført.

Fartøy-struktur interaksjon: Når fartøy blir større i tillegg til at bølge, strøm og vindkrefter øker i eksponert havbruk blir interaksjonskrefter mellom fartøy og struktur viktig å analysere. En annen forskningsoppgave er å utvikle kontaktløs operasjon, som krever en DP (dynamisk posisjonering) som hensyntar at propellstrålen ikke skal treffe oppdrettskonstruksjon, muligens i kombinasjon med nye fortøyningsløsninger. Større fartøy medfører også større propulsjonsenheter, der propellstrålen blir kraftigere og kan påvirke fisken negativt.

Logistikkoptimering: Logistikkoptimering og

mulighetsstudier er viktig for å utvikle nye fartøysdesign og logistikk-løsninger som fungerer optimalt, også for eksponerte og fjerntliggende områder. Sentrale ytelsesparametere innen økonomi, miljø, HMS og logistikk kan brukes til vurdering og sammenligning av robuste og kostnadseffektive logistikk-løsninger med fiskevelferd i fokus.

Operasjonsgrenser: For å unngå personskade, sikre sikker operasjon og evaluere ulike typer utstyr og fartøy mot hverandre er operasjonsgrenser essensielle. Operasjonsgrenser kan bidra til at operasjoner avbrytes i tide basert på objektive kriterier. Ved å definere operasjonsgrenser kan man også sammenligne ulike design mot hverandre og vurdere operabilitet til de ulike fartøyene. Operasjonsgrenser er ikke tydelig definert for havbruksoperasjoner og er en utfordring det bør jobbes med.

Industriell relevans

Robuste fartøysdesign tilpasset eksponerte områder vil øke operabilitet og produksjon for eksponerte havbruksinstallasjoner, uten at det går på bekostning av sikkerhetsnivået. Optimaliserte logistikk-løsninger er essensielle for å redusere kostnaden ved å flytte havbruksnæringen offshore.

Forskningsleder: Ørjan Selvik (SINTEF Ocean)



Publikasjoner og rapporter

Holmen, Ingunn Marie, Lien, Andreas M., Fathi, Dariusz, Ratvik, Ingeborg (2017). *Prosjektnotat: EXPOSED: Farer i havbruksoperasjoner*. Oppsummering av arbeidsmøter i P3 og P4 i 2016

Shen, Y.-G., Greco, M., Faltinsen, O. M., Nygaard, I., (2018), *Numerical and experimental investigations on mooring loads of a marine fish farm in waves and current*. J. Fluid. Struct 79, 115-136.

Faltinsen, O. M., Shen, Y.-G., (2018), *Wave and current effects on floating fish farms*. J. Marine. Sci. Appl. 2018, 17 284-296.

Shen Y (2018), *Operational limits for floating-collar fish farms in waves and current, without and with well-boat presence*. Doctoral thesis at NTNU; 2018:367

Jin, Jingzhe; Selvik, Ørjan; Yin, Decao; Yang, Xue; Aksnes, Vegard Øgård; Fathi, Dariusz Eirik (2018). *Review on Typical Marine Operations in Aquaculture and Numerical Simulation of One Example Operation Scenario*. The 28th International Ocean and Polar Engineering Conference, 10-15 June, Sapporo, Japan; 2018-06-10 - 2018-06-15. SINTEF OCEAN, NTNU

Lona, E., & Selvik, Ø. (in press). *Fartøysdesign for eksponert havbruk*. SINTEF Ocean.

Shen, Y.-G., Greco, M. and Faltinsen, O. M. (2019a), *Numerical study of a well boat operating at a fish farm in current*. J. Fluid. Struct. 2019, 84 77-79.

Shen, Y.-G., Greco, M. and Faltinsen, O. M. (2019b), *Numerical study of a well boat operating at a fish farm in long-crested irregular waves and current*. J. Fluid. Struct. 2019, 84 97-121.

Slette, Hans Tobias; Asbjørnslett, Bjørn Egil & Fagerholt, Kjetil (2019). *Cost-Emission Relations for Maritime Logistics Support in Aquaculture*. J. Phys.: Conf. Ser. **1357** 012029. 2019.

Lianes, Ingeborg Margrete; Noreng, Maren Theisen; Fagerholt, Kjetil; Slette, Hans Tobias; Meisel, Frank (2021). *The Aquaculture Service Vessel Routing Problem with Time Dependent Travel Times and Synchronization Constraints*. *Computers & Operations Research* ;Volum 134. 2021.

Slette, Hans Tobias; Asbjørnslett, Bjørn Egil; Pettersen, Sigurd Solheim;

Erikstad, Stein Ove (2022). *Simulating emergency response for large-scale fish welfare emergencies in sea-based salmon farming*. *Aquacultural Engineering* ;Volum 97. 2022.

Slette, Hans Tobias; Asbjørnslett, Bjørn Egil; Fagerholt, Kjetil; Lianes, Ingeborg Margrete; Noreng, Maren Theisen (2022). *Effective utilization of service vessels in fish farming: fleet design considering the characteristics of the locations*. *Aquaculture International*. 31, pages 231–247 (2023).

Presentasjoner og konferanser

Zang, Yuyang (2017). *Sommerprosjekt 2017: Feed barge analysis tool*

Berthelsen, Maiken (2017). *Sommerprosjekt 2017: Exposed data tool*

Slette, H.T. (2019). *Improve knowledge on logistics support in exposed aquaculture*. Ocean Week 2019

Slette, H.T. (2019). *Fartøysdesign i eksponert havbruk*. TEKNA kveldsseminar: Eksponert havbruk

Slette, H.T. (2019). *Fartøy i havbruk*. Aqua Nor 2019

Slette, H.T. (2021). *Tilgjengelighet for fartøysoperasjoner på eksponerte lokaliteter*. Aqua Nor 2021

Meisel, Frank; Lianes, Ingeborg Margrete; Noreng, Maren Theisen; Fagerholt, Kjetil; Slette, Hans Tobias (2021). *Routing of Service Vessels for Aquaculture Fish Farming*. Hamburg International Conference of Logistics

Jin, Jingzhe; Indergård, Robert; Lona, Eivind (2022). *Numerical Modelling of a Typical Marine Operation Scenario in Aquaculture*. *Aquaculture Europe 2022*.

Masteroppgaver og avhandlinger

Alexander Wallem Berge, Henrik Theodor Ramm (2017). *Fleet Scheduling of Service Vessels used in a more exposed Norwegian Aquaculture Industry*

Runar Stemland (2017). *Assessment of Service Vessel Operability In Exposed Aquaculture*

Hanne Hornsletten (2017). *Optimization Model Aimed for the Aquaculture*

Industry for Fleet Composition and Routing of Wellboats

Marius Gyberg Haugland, Sondre Thygesen (2017). *Use of Clusters in a Route Generation Heuristic for Distribution of Fish Feed*

Henrik Håkonsen (2017). *Emergency preparedness and response in Aquaculture*

Erik Andreas Næstvold (2017). *Simuleringsmodell som beslutningsstøtte for valg av tiltak mot lakselus på lokalitetsnivå*

Ole-Johan Nekstad (2017). *Modularization of Aquaculture Service Vessels - An Approach for the Implementation of Operational Flexibility*

Adrian Stenvik (2017). *Fleet Size and Mix in the Norwegian Aquaculture Sector. A stochastic fleet renewal problem with an uncertain future*

Ronja Eide Lilienthal, Ragni Rørtveit (2017) *Discrete-Event Simulation of a Multimodal Downstream Supply Chain for Future Norwegian Aquaculture*

Jens Kristian Hole M (2017) *Risikobasert design av fartøy og merd for eksponert havbruk*

Simen Aleksander Haaland (2017) *Semi-closed containment systems in Atlantic salmon production – Comparative analysis of product strategies*

Øyvind Haug Lund, Trym Sogge Sjøberg (2018) *Evaluation and Comparison of Operability and Operational Limits of Service Vessel Designs in Exposed Aquaculture*

Slette, H.T. (2023), *Vessel Operations in Exposed Aquaculture – Achieving safe and efficient operation of vessel fleets in fish farm systems experiencing challenging metocean conditions*. Department of Marine Technology, NTNU.



Metoder og modeller for prosjektering av fartøy og fartøysoperasjoner i eksponert havbruk

VEILEDERE

Professor [Bjørn Egil Asbjørnslett](#) (NTNU)
 Professor [Stein Ove Erikstad](#) (NTNU)
 Professor [Pål Lader](#) (NTNU)
 Professor [Kjetil Fagerholt](#) (NTNU)

PERIODE

Q3 2018 – Q3 2022

Design av fartøy, utstyr og logistiske løsninger må heves til et slikt nivå at sikkerhet og effektivitet i operasjoner ikke blir dårligere på eksponerte lokaliteter.

Det er fire punkter som er fremhevet for forskningsarbeid innen område 4. Økt kunnskap innenfor disse skal bidra til utvikling av robuste fartøysdesign og optimalisert logistikk. Dette vil igjen føre til at operabilitet og produksjon på eksponerte anlegg kan økes uten å kompromittere sikkerheten.

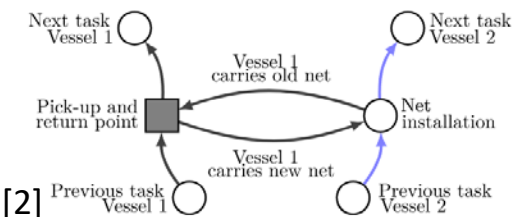
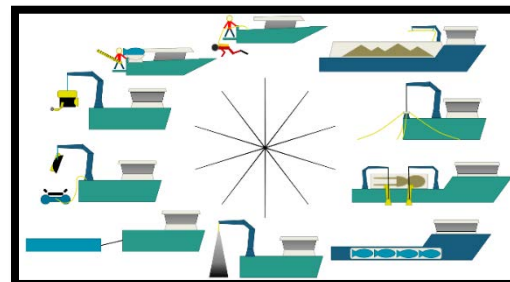
Punkt 1: Studere og utvikle nye design for alle tre fartøystyper, med nødvendig sjødyktighet, anleggsinteraksjon og utstyr for operasjoner på eksponerte lokasjoner.

Punkt 2: Analysere oppførselen til flytende objekter og den relative bevegelsen mellom fartøy og anlegg ved hjelp av simuleringer og annen programvare.

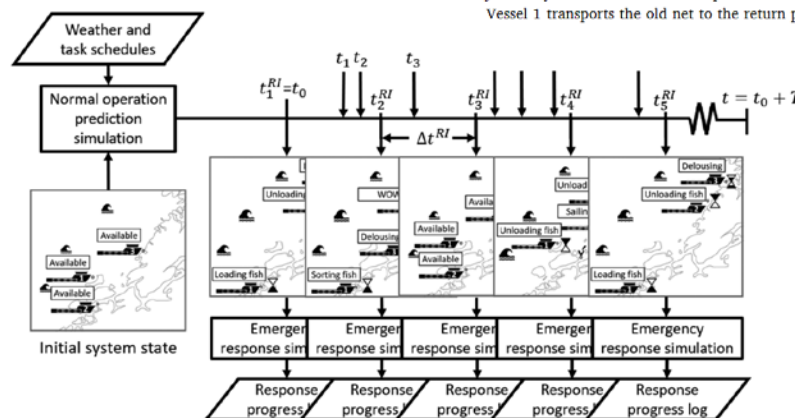
Punkt 3: Utvikle simuleringermodell for eksponert havbruk som muliggjør simulering av kritiske operasjoner. Simulering kan da brukes til å evaluere hvor godt et foreslått fartøysdesign passer i den tiltenkte rollen, og dermed brukes som et ledd i designprosessen.

Punkt 4: Nye logistiske løsninger som tar hensyn til endringene i fartøy og flåteoperasjoner. Viktige aspekter er blant annet onshore og offshore lagring, og personell- og utstyrlogistikk.

Arbeidet går på tvers av disse fire punktene og ser på effekten i anvendelse av båtene gjennom bruk av simuleringermodeller.



[2] Precedence and synchronization exemplified by net operations. Vessel 1 picks up a new net and then transports it to the location. Upon arrival it is joined by Vessel 2. The vessels perform the net installation together before Vessel 1 transports the old net to the return point.



[3]

Fig. 2. Conceptual illustration of the method. Based on the initial system state, future system states are predicted, with the system state changing at irregular intervals, e.g., at t_1 and t_2 . The response is tested at regular intervals, Δt^{RI} , over the time period T .

Artikler:

[1] Slette, Hans Tobias; Asbjørnslett, Bjørn Egil & Fagerholt, Kjetil. *Cost-Emission Relations for Maritime Logistics Support in Aquaculture*. J. Phys.: Conf. Ser. **1357** 012029. 2019.

[2] Lianes, Ingeborg Margrete; Noreng, Maren Theisen; Fagerholt, Kjetil; Slette, Hans Tobias; Meisel, Frank. *The Aquaculture Service Vessel Routing Problem with Time Dependent Travel Times and Synchronization Constraints*. Computers & Operations Research ;Volum 134. 2021.

[3] Slette, Hans Tobias; Asbjørnslett, Bjørn Egil; Pettersen, Sigurd Solheim; Erikstad, Stein Ove. *Simulating emergency response for large-scale fish welfare emergencies in sea-based salmon farming*. Aquacultural Engineering ;Volum 97. 2022.

[4] Slette, Hans Tobias; Asbjørnslett, Bjørn Egil; Fagerholt, Kjetil; Lianes, Ingeborg Margrete; Noreng, Maren Theisen. *Effective utilization of service vessels in fish farming: fleet design considering the characteristics of the locations*. Aquaculture International. 31, pages 231–247 (2023).

[5] Slette, Hans Tobias; Lader, Pål Furset; Asbjørnslett, Bjørn Egil. *Operability for vessel operations at marine fish farms for Atlantic salmon*. (In progress).

Begrensende operasjonelle forhold for brønnbåt

VEILEDERE

Professor [Marilena Greco](#) (NTNU)

PERIODE

Q3 2013 – Q4 2018
Disputert 2018.

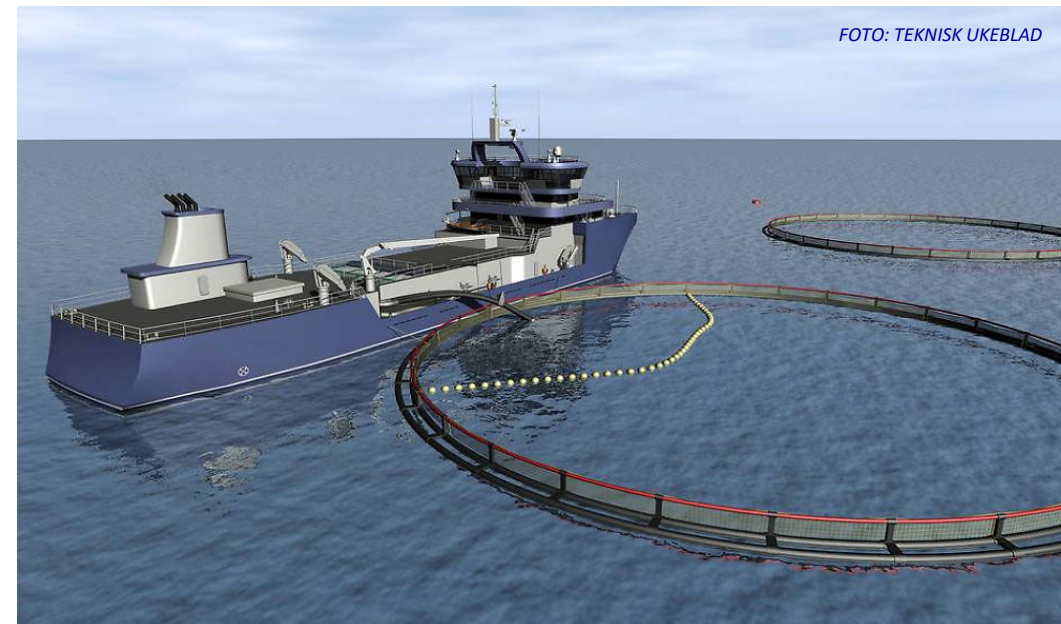
Denne studien fokuserer på operasjonelle grenser for flytende oppdrettsmerder i bølger og strøm, og undersøker også brønnbåtenes påvirkning på anlegget.

Dynamisk respons til et flytende oppdrettsanlegg med flytekrage, både med og uten brønnbåt tilstede, er analysert for strøm og regulære eller irregulære bølger. En moderne brønnbåt og et anlegg med en merd ble vurdert. Sistnevnte består av en flytekrage, en elastisk bunnring, ei lukket, fleksibel not og et komplekst fortøyningsystem. Hovedhensikten var å avgjøre driftsforholdene for oppdrettsanlegget isolert sett og for brønnbåt-oppdrettsanlegg-systemet.

Det har blitt utviklet en programvare for analyser i tidsplanet som benytter state-of-the-art teoretiske og numeriske formulering for oppdrettsanlegget, med og uten brønnbåten tilstede.

Operasjonsgrensene til oppdrettsanlegget ble bestemt gjennom systematiske simuleringer i regulære bølger og strøm. Disse indikerte at reduksjon av notvolum er den største begrensningen for at oppdrettsanlegget kan operere på mer eksponerte lokaliteter.

Systematiske simuleringer utførtes også for å bestemme driftsforholdene til det koblede systemet, utsatt for langkammede irregulære bølger og strøm. Numeriske resultater viste at maksimumspenningen i flytekragen kan komme nær flytegrensen når systemet opererer i moderate sjøtilstander, og noe som bør hensyn til.



Artikler:

Shen, Y.-G., Greco, M., Faltinsen, O. M., Nygaard, I., (2018), *Numerical and experimental investigations on mooring loads of a marine fish farm in waves and current*. J. Fluid. Struct. 79, 115-136.

Faltinsen, O. M., Shen, Y.-G., (2018), *Wave and current effects on floating fish farms*. J. Marine. Sci. Appl. 2018, 17 284-296.

Shen Y (2018), *Operational limits for floating-collar fish farms in waves and current, without and with well-boat presence*. Doctoral thesis at NTNU; 2018:367

Shen, Y.-G., Greco, M. and Faltinsen, O. M. (2019a), *Numerical study of a well boat operating at a fish farm in current*. J. Fluid. Struct. 2019, 84 77-79.

Shen, Y.-G., Greco, M. and Faltinsen, O. M. (2019b), *Numerical study of a well boat operating at a fish farm in long-crested irregular waves and current*. J. Fluid. Struct. 2019, 84 97-121.

PROSJEKTLEDER

Ørjan Selvik (SINTEF Ocean)

PARTNERE INVOLVERT

NTNU IMT, Møre Maritime, Marin Design, AQS, Aqualine, Kongsberg Seatex, Kongsberg Maritime, Cermaq, MacGregor, DNV

PERIODE

Q4 2015 – Q4 2018

TYPE FORSKNING

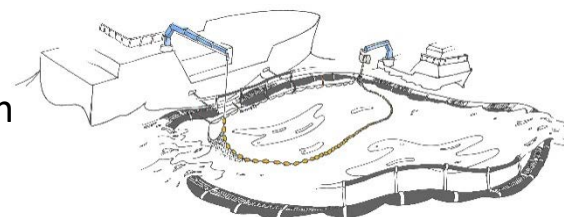
Industriell/Grunnleggende

Eksponerte havbruksoperasjoner vil stille nye krav til fartøy og utstyr for å sikre trygge operasjoner, god operabilitet og lønnsomhet. Interaksjonen mellom fartøy og havbruksinstallasjon vil være viktig under operasjonene.

Prosjektet har undersøkt nye designkonsept for fartøy og grensesnittet mot havbruksinstallasjonene for økt pålitelighet av eksponerte havbruksoperasjoner. Det forventes at større fartøy vil innføre nye krav til design av flytekrage og forankringssystem, som betyr at samspillet mellom den fleksible kragen og skipssiden vil være viktig (i hvert fall om man tenker på en videreføring av dagens merdkonsept). Fokus på de reelle operasjonene vil være viktig for å redusere risikoen og øke sikkerhet, operabilitet og lønnsomhet.

Prosjektet vil starte med et studie på å identifisere utfordringene vi står ovenfor i eksponerte havbruksoperasjoner, både med hensyn til fartøy, havbruksinstallasjon, mannskap og fisk. Videre vil det være egne arbeidspakker knyttet til fartøysdesign (nye design og løsninger), eksponerte operasjoner (anvendelse av ny teknologi og nye prosedyrer) samt mulighetsstudier.

Prosjektet vil kombinere ekspertise fra flere av forskningsområdene i SFI EXPOSED.



Resultater:

- [Metode for mulighetsstudier](#)
- [Brønnbåtsimulering](#)
- [Verktøy for analyse av fôrflåter](#)
- [Koblet analyse av merd og brønnbåt](#)
- [Designoppfølging](#)
- [Fartøysdata for servicekatamaran](#)
- [Operasjonsgrenser](#)

Innovasjonspotensiale:

- Simulering av brønnbåter vil gi økt kunnskap om optimal størrelse, sammensetning og kapasitet på flåten, men også effektivt vurdere nye skipskonsepter. Mulig å simulere hvordan en valgt logistikk-løsning vil prestere over tid (f.eks. ett år)
- Økt forståelse av interaksjon mellom fartøy og struktur vil bidra til fartøysutvikling, utstyrsutvikling og metodeutvikling for eksponert havbruk.
- Gjennom økt forståelse for fartøysrespons og operasjonsgrenser vil man kunne tilpasse fartøysdesign og utstyr til operasjon og dermed øke operabilitet. Økt forståelse vil også kunne gi sikrere operasjoner i et større værvindu.

Metode for mulighetsstudier – utvikling av fartøyskonsept og logistikk-løsninger for eksponert havbruk

Metode for mulighetsstudier for utvikling av nye skipsdesign og logistikk-løsninger. Et viktig hovedmål har vært å danne et grunnlag for utvikling av robuste og kostnadseffektive logistikk-løsninger med fiskevelferd i fokus.

Med utgangspunkt i sentrale ytelsesparameter innen økonomi, miljø, HMS og logistikk, har arbeidets hovedformål vært å beskrive en metodikk for effektiv vurdering og sammenligning av ulike fartøyskonsept tidlig i designfasen. Dette som utgangspunkt for utvikling av robuste og kostnadseffektive logistikk-løsninger med fiskevelferd i fokus.

Verdien i slike mulighetsstudier er ikke bare knyttet til vurdering av det enkelte fartøy, men også hvordan ulike flåte-sammensetninger, vil presentere i en operasjonell virkelighet – over tid.

En samling av relevante ytelsesparameter (Key Performance Indicators) er foreslått som utgangspunkt for vurdering alternative fartøyskonsept.

Figuren viser – helt overordnet –

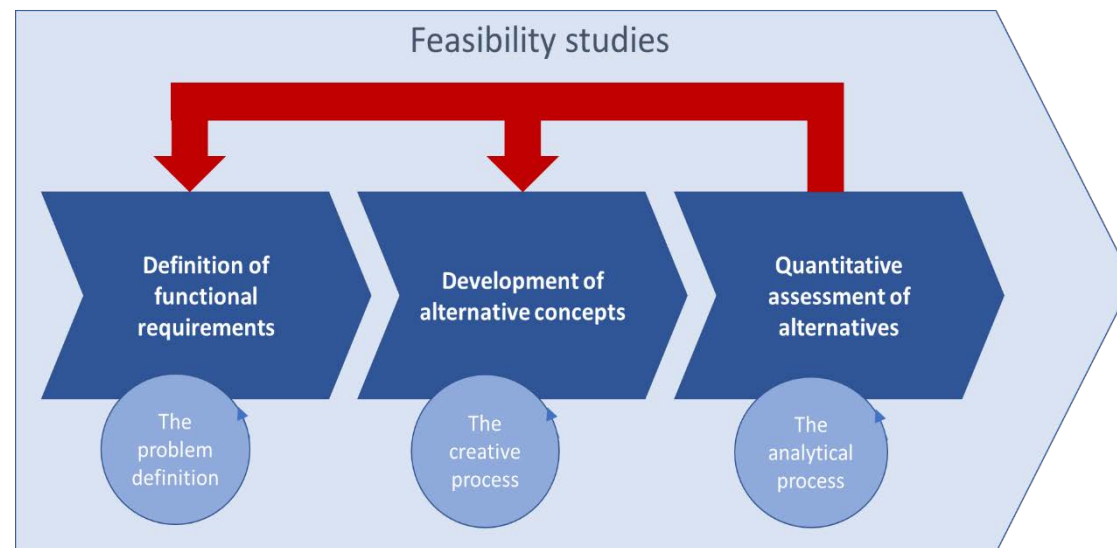
hvordan metoden er bygget opp i ulike faser:

1. Definition of functional requirements: Her defineres fartøys funksjonskrav og det operasjonelle miljøet beskrives.
2. The creative process: Med utgangspunkt i fase 1 utvikles nye fartøyskonsept, men også nye operasjonelle løsninger.
3. The analytical process: Resultatene fra fase 1 og fase 2 benyttes som grunnlag for kvalitativ og kvantitativ vurdering – bl.a. ved bruk av et simuleringsverktøy.

Metoden vektlegger en iterativ utviklingsprosess basert på åpen samhandling mellom forskere, redere, skipsdesignere og oppdrettselskaper.

Arbeidet har tatt utgangspunkt i en metode utviklet for offshore olje og gass

logistikk - hvor hovedmålet var å effektivt kunne vurdere systemytelsen til forsyningslogistikken ved ulike felt.



Brønnbåtsimulering

Med utgangspunkt i metoden for mulighetsstudier – utviklet demonstrator for simulering av brønnbåtoperasjoner for effektiv vurdering og sammenligning av ulike fartøy. Herunder også utvikling av nye fartøyskonsept. Dette for at næringen skal kunne utvikle nye og bedre logistikk-løsninger, og særlig for operasjoner ved eksponerte lokaliteter.

Arbeidet har så langt resultert i en demonstrator som viser hvordan et ferdig utviklet verktøy kan benyttes for utvikling og vurdering av nye fartøyskonsept, men også for optimal utnyttelse av eksisterende flåte.

Et ferdig verktøy vil gjøre det mulig å effektivt sammenligne ulike fartøyskonsept og flåtesammensetninger, f.eks. brønnbåt vs. slaktebåt eller ulike brønnbåtdesign. Dette med utgangspunkt i forhåndsdefinerte ytelses-parameter som f.eks. kostnad, tidsforbruk, punktlighet, drivstoff forbruk, laste- kapasitet og utnyttelse, etc. Verktøyet har også mulighet til å hensynta vær-data, slik at fartøyets/flåtens ytelse over tid kan simuleres.

Verktøyet kan dermed benyttes som beslutningsunderlag for fremtidige investeringer i flåte, hva gjelder størrelse og sammensetning av skip. En vil også kunne gjøre vurderinger med tanke på lagerstørrelse og kapasitet ved ventemerdd, for derigjennom identifisere potensielle kostnadsbesparelser.

Per i dag er det gjennomført en enkel analyse og

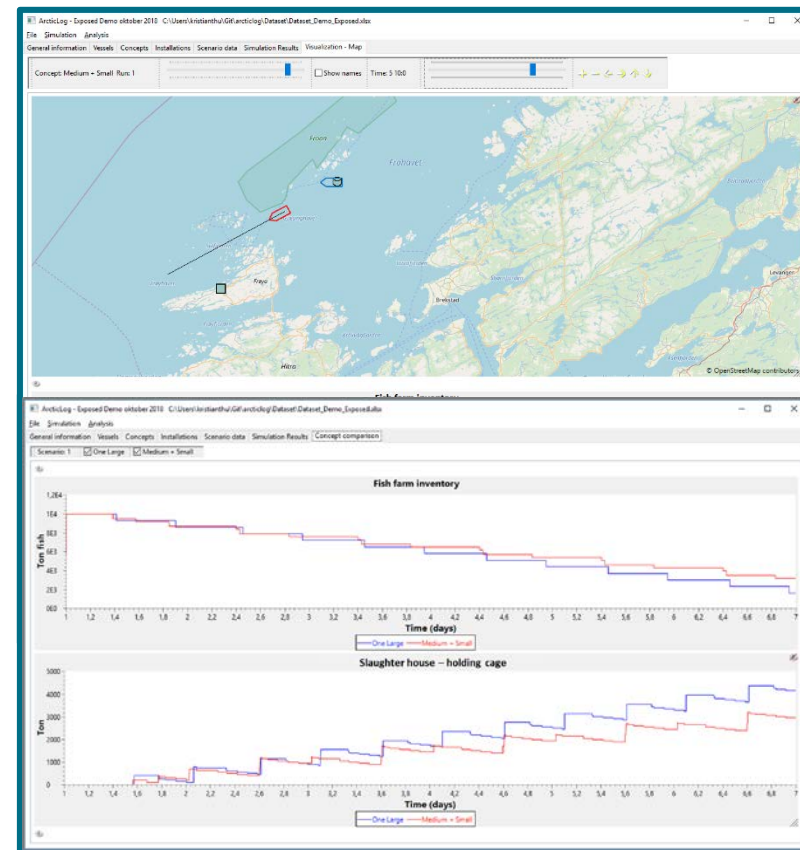
sammenligning av effektiviteten mellom to ulike logistikk-løsninger:

1. Ytelsen til ett stort fartøy (4500 m³)
- vs.
2. Ytelsen til ett medium fartøy (3.500 m³) og ett lite fartøy (2000 m³).

For analysen er det tatt utgangspunkt i at all fisk hentes ved Havmerd 1 og leveres ved InnovaMar – Nordskaget.

Grafen "Fish farm inventory" viser hvordan volum av slakteklar fisk over tid minker ved Havfarmen, samt hvor effektive de to logistikk-løsningene er – over tid – sammenlignet med hverandre. Grafen "Slaughter house – holding cage" viser hvordan kapasiteten i ventemerdd utnyttes over tid.

Grafene viser ytelsen over en uke. Verktøyets nytteverdi øker ytterligere gjennom muligheten til å simulere hvordan en valgt logistikk-løsning vil prestere over ett helt år – og utvidet ved at flere lokaliteter besøkes.



Verktøyet åpner muligheten for at redere, skipsdesignere, oppdrettere og forskere kan samle seg rundt samme bord for en felles vurdering av ulike fartøystyper og operasjoner ved eksponerte havbrukslokaliteter. F.eks. vil reder se hvordan fartøy utnyttes og yter over tid, samt at oppdretterne får en oppfatning om hvor pålitelige de nye fartøyene vil være med tanke på å få utført planlagte oppdrag.

Verktøy for analyse av fôrflåter

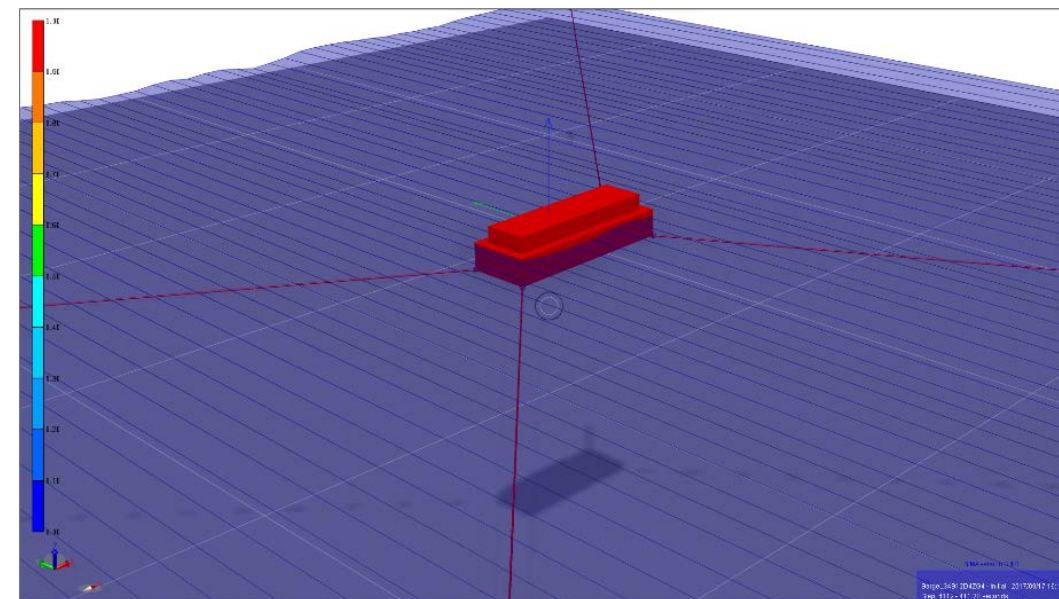
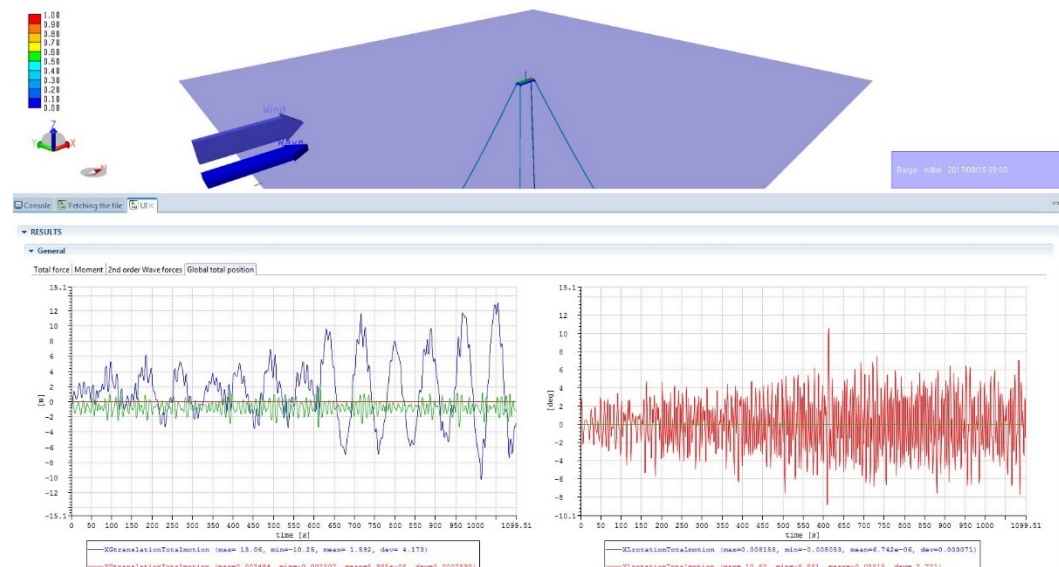
Havbruksnæringen jobber for å utnytte mer eksponerte lokaliteter. Det er da nødvendig for å gjøre mer avanserte analyser for fôrflåter.

For å effektivt kunne beregne bevegelser og fortøyningskrefter fra fôrflåter har SFI Exposed P3 laget et verktøy for å effektivt kunne gjøre slike analyser.

Verktøyet består av en database med hydrodynamiske koeffisienter for fôrflåter og et brukergrensesnitt i arbeidsbenken SIMA. SIMA er en arbeidsbenk for simulering og analyse av marine operasjoner og flytesystemer. Beregningene for et sett med flåtegeometrier ble utført ved bruk av SINTEF Oceans 3D panelmetode MULDI. Beregningsprosessen ble automatisert for å enkelt kunne legge til nye forflåter. Viskøs demping i rull og stamp estimeres og brukes i MULDI beregningene.

For å bruke verktøyet spesifiserer brukeren dimensjoner og masseegenskaper til fôrflåten som skal analyseres i SIMA, og verktøyet finner den nærmeste fôrflåten fra databasen.

Brukergrensesnittet i SIMA gjør det enkelt å spesifisere værtilstand og parametere for fortøyning. Brukergrensesnittet i SIMA en postprocessor som blant annet visualiserer resultatet i form av en animasjon og grafer.



Koblet analyse av merd og brønnbåt

Forståelsen av krefter mellom fartøy og struktur øker når havbruksnæringen blir mer eksponert for vind, bølger og strøm.

En analyse av krefter og integritet til fortøyningslinjer, samt liner mellom fartøy og struktur bør derfor gjøres. For å øke kunnskapen om kontaktkrefter mellom fartøy og struktur er det gjennomført en studie i SIMA .

En studie av brønnbåt fortøyd til merd er gjennomført i SIMA ved å benytte en koblet SIMO-RIFLEX simulering for å finne bevegelser og kraftrespons til det koblede systemet. I studien benyttes regulære bølger og strøm. RIFLEX er benyttet til å modellere merd og fortøyningslinjer. WAMIT er brukt for å finne hydrodynamiske koeffisienter til brønnbåten som er importert til SIMO i SIMA arbeidsbenk.

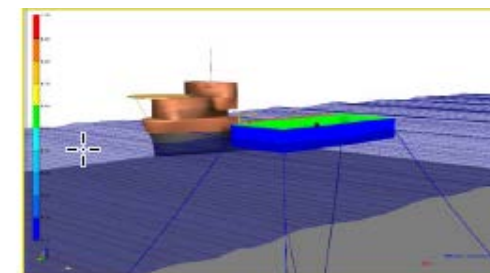
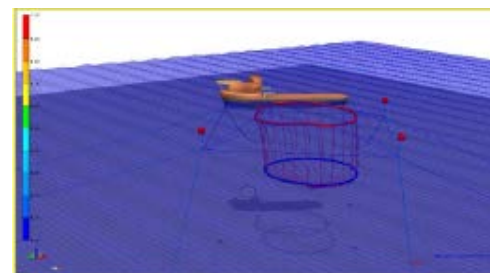
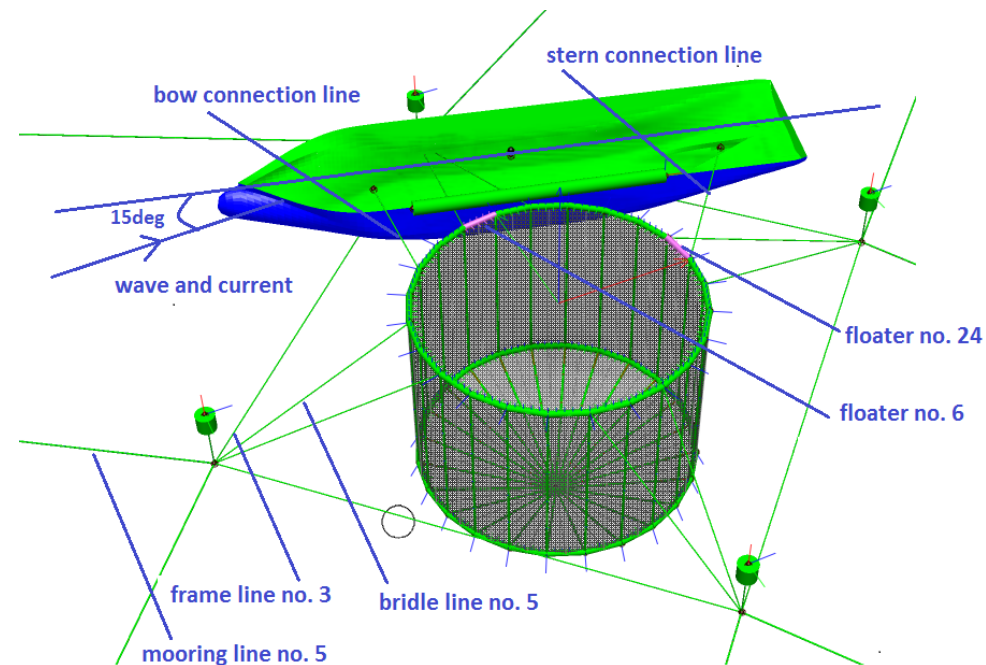
Resultatet fra simuleringen er publisert på ISOPE (28th International Ocean and Polar Engineering Conference), 10. – 15. juni i Sapporo, Japan.

Artikler:

Jin, Jingzhe; Selvik, Ørjan; Yin, Decao; Yang, Xue; Aksnes, Vegard Ølgård; Fathi, Dariusz Eirik (2018). *Review on Typical Marine Operations in Aquaculture and Numerical Simulation of One Example Operation Scenario*. The 28th International Ocean and Polar Engineering Conference, 10-15 June, Sapporo, Japan; 2018-06-10 - 2018-06-15. SINTEF OCEAN, NTNU

Dette arbeidet bygger videre på arbeidet gjort av sommerstudent Mona Tofte i 2016. Dette arbeidet undersøke om arbeidsbenken SIMA kan benyttes til simulering av havbruksoperasjoner. SIMA er et verktøy utviklet av SINTEF Ocean. SIMA er mye brukt for simulering av marine operasjoner i olje- og gassindustrien, samt offshore vind. Artikkelen [Jin et al. 2018](#) beskriver funnene, samt et eksempel i SIMA som ble utarbeidet. Eksempelet inkluderer en fôrflåte ved en fôrflåte, både fortøyd og på DP, samt en DP operasjon ved en merd.

Analysemetodikken ble oppdatert til å håndtere irregulær sjø, og metodikk og resultater fra et eksempel case ble presentert på Aquaculture Europe 2022 konferansen.



Designoppfølging

I prosjektet har SINTEF Ocean i samarbeid med Møre Maritime og Marin Design gjort vurderinger av nye design for fartøy til bruk i havbruksnæringen.

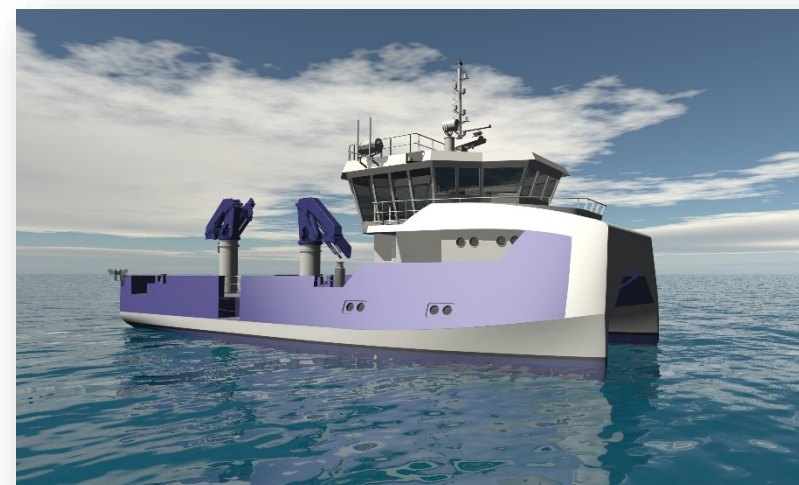
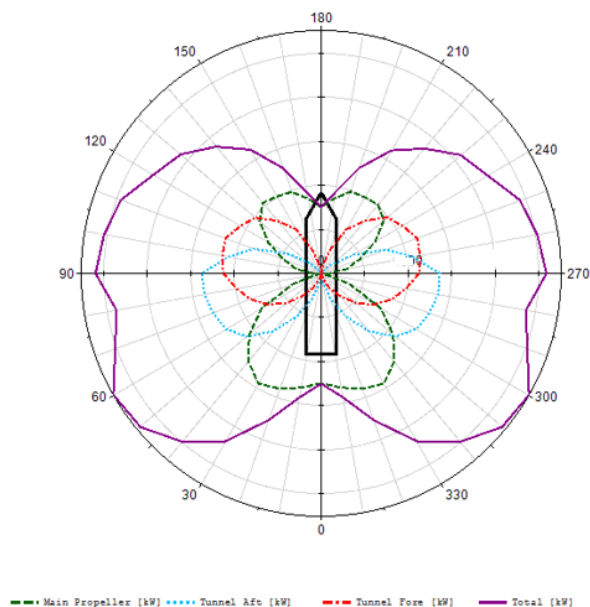
SINTEF Ocean har bidratt med optimalisering av skroglinjer for å minke motstand og dermed redusere effektbehov og utslipp fra fartøy. Dette er blant annet gjort for en kombinasjonsforbåt, servicekatamaraner og brønnbåt.

Det er også gjort mer avanserte studier hvor en har benyttet CFD (Computational Fluid Dynamics) for å beregne skrogmotstand og strømning rundt fartøyet.

For fartøy som skal ligge på DP er det viktig å estimere kraftbehov for å holde posisjon under ulike miljøkrefter. SINTEF Ocean har bidratt med en statisk DP beregning ved hjelp av arbeidsbenken ShipX og Stationkeeping plug-in. I disse studiene er det benyttet målte miljødata samlet inn i SFI Exposed.

For fartøy som skal operere i eksponerte områder er også rulledempning viktig. I

den sammenheng har SINTEF Ocean også bidratt med vurdering ifb. design og plassering av stab. tanker.



Fartøysdata for servicekatamaran

I SFI Exposed prosjekt 3 (P3) har det foregått datainnsamling på AQS Loke. AQS Loke er en 25 m servicekatamaran som hovedsakelig arbeider med fortøyning og slep.

Hensikten med målingene ombord på MS Loke er å bidra i arbeidet med å finne objektive operasjonskriterier for fartøy i havbruksnæringen. For å gjøre dette måles Lokes bevegelser og posisjon. Når man kjenner tid og posisjon kan man finne bølgehøyde og periode fra Meteorologisk institutt.

Kongsberg Seatex har avansert måle- og monitoringsutstyr ombord som blant annet består av en MRU H (Motion Reference Unit, modell H) og en VMM (Vessel Motion Monitoring) enhet. I tillegg til dette står det en logge PC om bord som også er koblet til fartøyets vindsensor og GPS.

AQS benytter seg av Naviaq som system for å skrive operasjonslogg. I denne noteres blant annet hva fartøyet jobber med, forhold som påvirker drift og om det er væravbrudd.

Hvis en operasjon er pågående og får væravbrudd er det mulig å knytte avbrudd til operasjon, og på den måten benytte målinger til å finne kriterier (på f.eks. akselerasjoner eller rullebevegelser) for når en spesiell operasjon

avbrytes.

Typiske operasjoner for Loke er:

- Transitt
- Anløp mot merd
- Utsett/innhenting av ROV
- Dykking
- Løft av bøye med kran
- Løft av koblingsplate med kran
- Stramming av fortøyning med koblingsplate om bord
- Løft av bunnringkjetting med kran
- Løft av not med kran
- Bruk av varpevinsj
- Sleping



Operasjonsgrenser

For å unngå skade på fartøy, utstyr og personell kan det være nødvendig å begrense eller stanse operasjon i sterk vind og grov sjø. Begrensninger i form av vindstyrke og bølgehøyde er avhengig av operasjonen, av kapasiteten til utstyret og fartøyet. Operasjonsgrenser er også viktige for å sammenligne ulike fartøysdesign.

Operasjonsgrenser finnes for mange typer operasjoner, men er ikke definert for typiske havbruksoperasjoner. I SFI Exposed P3 har vi begynt arbeidet med å finne operasjonsgrenser for typiske havbruksoperasjoner.

For å finne operasjonskriterier bør arbeidsoperasjoner kategoriseres i kategorier. Basert på workshops som har vært gjennomført i SFI Exposed har en gjort en grovgruppering av typiske arbeidsoperasjoner. Som et første utkast er følgende operasjonsgrupper skissert:

- Transport av dekkslast
- Sleping
- Løfting/nedsetting
- Manuelt arbeid på dekk

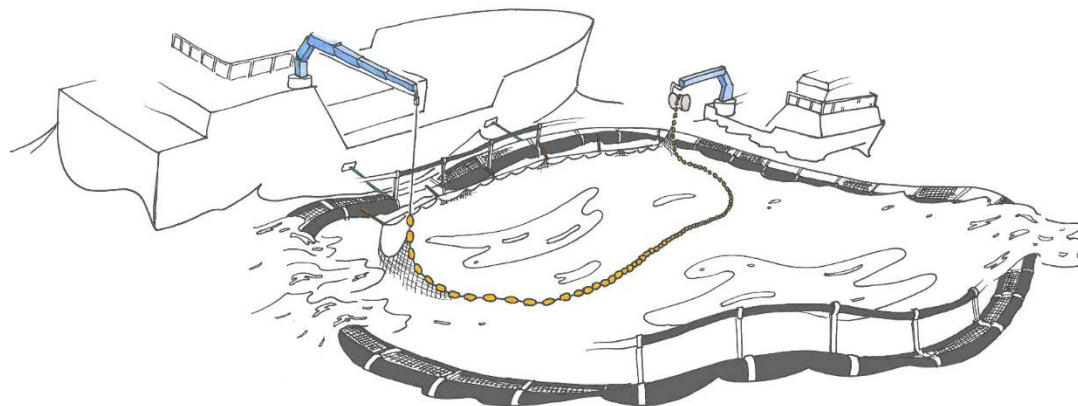
Disse operasjonene må være relatert til målbare, predikerbare og potensielt kritiske parametere. Dette er ytre miljø som bølger (bølgehøyde og periode), vind og strøm. Videre er fartøysrespons som bevegelse (jag, svai, hiv, rull og stamp), hastighet, akselerasjon, relativ bevegelse mellom fartøy og bølger (fribord) og strekk i liner (slepeliner og løfteliner) viktige parametere.

For de ulike operasjonene er det ulike av disse kriteriene som er en primær operasjonsbegrensning eller sekundær operasjonsbegrensning.

Andre kriterier som kan gi operasjonsbegrensninger er friksjon mot dekk, slepekraft og pendelbevegelse av last.

Små arbeidsfartøy som benyttes i havbruksnæringen har normalt ikke instrumentering for direkte måling av bølgeindusert bevegelse og belastning. Det er derfor nødvendig å kvantifisere forhold mellom kritiske responsparametere og miljøparametere slik at kriteriene kan spesifiseres som værparametere.

Metodikk for beregning av operasjonskriterier er beskrevet i rapporten Lona, E., & Selvik, Ø. (in press). Fartøysdesign for eksponert havbruk. SINTEF Ocean.



PROSJEKTLEDER

Ørjan Selvik (SINTEF Ocean)

PARTNERE INVOLVERT

Marin Design, Møre Maritime, AQS, Lerow, Aqualine, MOWI, Kongsberg Maritime Merchant Marine, Kongsberg Seatex, MacGregor, NTNU IMT, SINTEF

PERIODE

Q1 2019 – Q4 2019

TYPE FORSKNING

Industriell (delvis grunnleggende)

Servicefartøy er en sentral og mye brukt ressurs i havbruksoperasjoner. Målet med prosjektet 'MS Exposed' er å utvikle en helhetlig designmetodikk for servicefartøy som kobler fartøysdesign, deksutrustning og operasjonell sikkerhet for eksponert havbruk. To designkonsept for fremtidens servicefartøy vil bli utviklet.

Mange havbruksoperasjoner er komplekse og innebærer en betydelig risiko for personskader, materiell skade og rømming av fisk. I dag er de fleste servicefartøy unike når det gjelder design og utrusting, noe som gjør det vanskelig å standardisere operasjonsprosedyrer. Målet med prosjektet er å utvikle en helhetlig designmetodikk for servicefartøy for sikre og effektive servicefartøy for eksponert havbruk.

Det er et betydelig potensial for innovative fartøysdesign for eksponert havbruk gjennom å kombinere fartøysdesign og sikkerhetsbarrieretenking. Ved å etablere et bibliotek for operasjoner,

operasjonelle krav, utstyr og nødvendige ressurser kan man øke hastighet på designprosessen og samtidig sikre at nye fartøy kan gjennomføre nødvendige operasjoner etter at de er bygd.

Prosjektet vil gi økt kunnskap om havbruksoperasjoner som gjennomføres og operasjonenes innflytelse på fartøysdesign. Sikkerhetstenkning vil bli inkludert i designprosessen gjennom å integrere sikkerhetsbarrierer og risikovurderinger. På lengre sikt vil prosjektet bidra til flere godt dokumenterte servicefartøydesign for havbruk i eksponerte områder.



<https://www.facebook.com/MarinDesignAS/photos/pcb.1876015975768554/1876013209102164/?type=3&theater>



<https://www.kyst.no/article/ny-sletta-baat-overlevert-denne-gang-til-froey-akvaressurs/>

Resultater:

- MS Exposed - Designmetodikk

Innovasjonspotensiale:

- Ny kunnskap som forbedrer designmetodikk for neste generasjons servicefartøy. Denne metodikken skal koble fartøysdesign, deksutrustning og fartøysdesign
- Økt kunnskap om havbruksoperasjoner og operasjonenes innflytelse på fartøysdesign
- Bidra til flere godt dokumenterte servicefartøysdesign for havbruk i eksponerte områder

Assosierte prosjekter:

- Stipendiatene Hans Tobias Slette og Ingunn M. Holmen (disputert 2022, se forskningsområde Sikkerhet), IMT, NTNU har vært tilknyttet prosjektet.

MS Exposed - Designmetodikk

I og med at det ofte er kort tid fra man ønsker å bestille et fartøy til fartøyet er levert, er det gunstig å standardisere fartøysdesignmetodikk. På den måten kan det gjøres en mer målrettet designprosess som også hensyntar operasjonserfaring, beregninger og risikovurderinger for arbeid som utføres av fartøyet.

Operasjons- og utstyrsoversikt

Ved å starte med å definere hvilke operasjoner fartøyet skal utføre kan man få en første oversikt over hvilket utstyr fartøyet skal bygges med, samt hvilken fartøysklasse som er nødvendig for gitt type operasjon. Det er en trend at fartøy blir mer og mer spesialiserte for enkelte operasjoner, noe som gjør at man kan begrense utstyr for å holde bygge- og driftskostnader nede.

I denne prosessen kan man benytte operasjons- og utstyrsoversikt utarbeidet i P17 i MS Exposed. Videre kan det også ses til fartøyskategoriseringen som er gjennomført.

Teknisk spesifikasjon og hoveddimensjoner

Basert på gjennomgang av operasjons- og utstyrsoversikt kan det utarbeides en teknisk spesifikasjon og hoveddimensjoner på fartøyet.

GA og 3D-modellering

Basert på teknisk spesifikasjon og hoveddimensjoner kan det utarbeides forslag til GA. I første omgang er

GA et godt utgangspunkt for å diskutere funksjon til fartøyet. Videre arbeid anbefales det å lage en 3D-modell av fartøyet, som vil være et supert utgangspunkt for å gjøre risikovurderinger i neste steg i designspiralen.

Risikovurdering av arbeidsoperasjoner

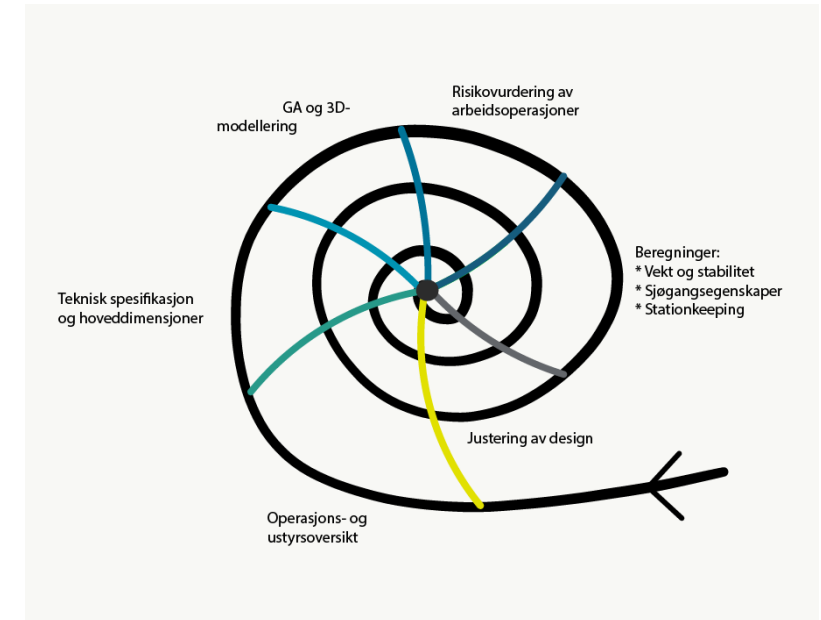
Benytte en workshop basert tilnærming til risikovurderinger av aktuelle operasjoner. Risikovurderingene er viktige for å merke opp soner, hensiktsmessig plassering av utstyr, sikre oversikt fra bro (slik at ikke personell arbeider i blindsoner fra styrhus), nødvendige sikkerhetsbarrierer blir etablert etc.

Beregninger

Kapabilitet til fartøy må beregnes;

- Vekts- og stabilitetsberegninger

Operabilitets- og sjøgangsberegninger for å se på hvordan fartøysdesignet håndterer eksponerte forhold



- Stationkeepingberegninger for å beregne nødvendig kapasitet på propulsjonseenheter

Operabilitetsberegninger

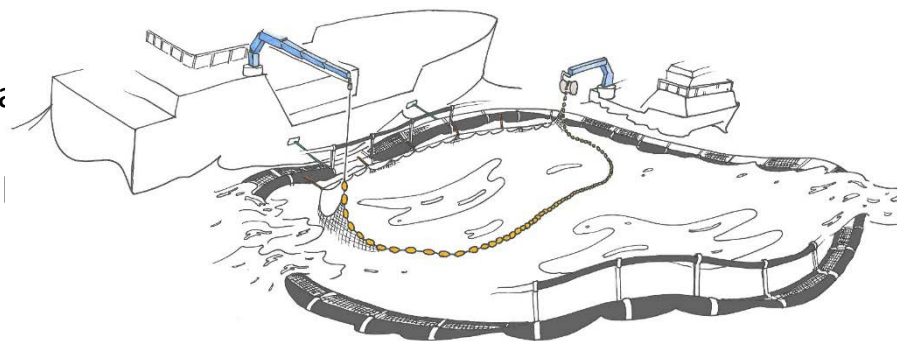
Beregning av operabilitet gjøres med utgangspunkt i følgende fire kategorier:

- Transport av dekkslast
- Sleping
- Løfting/nedsetting
- Manuelt arbeid på dekk

Metodikk for beregning av operasjonskriterier er beskrevet i rapporten Lona, E., & Selvik, Ø. (in press). Fartøysdesign for eksponert havbruk. SINTEF Ocean.

Kategorisering av servicefartøy og operasjoner, utstyr og fartøy

En oversikt over serviceoperasjoner, fartøysdesign og installert utstyr er etablert i form av et bibliotek. Informasjon er hentet fra tidligere arbeid i EXPOSD, master-oppgaver og andre relevante kilder. Hensikten er å se sammenheng mellom operasjoner fartøyet skal utføre, hvilken fartøysklasse fartøyet tilhører og nødvendig utstyr.



Kategorisering av servicefartøy

- Lokalitetsbåt (L 8-15m)**
 Daglig drift. Arbeid på merdkanten. Håndtering av not og bunnring. Assistanse til andre fartøy ved større operasjoner.
- Vaskebåt (L < 15m)**
 Primært notvask. Kan også utføre enklere servicefartøyoperasjoner.
- Servicefartøy (L < 15m)**
 Servicefartøyoperasjoner; fortøyning, sleping, avlusning.
- Servicefartøy (L < 24 m)**
 Servicefartøyoperasjoner; fortøyning, sleping, avlusning, notskifte.
- Spesialfartøy (L < 24m)**
 Spesialiserte fartøy som også er utrustet for å kunne utføre serviefartøyoperasjoner.
- Spesialfartøy (L > 24 m og GT < 500)**
 Spesialiserte fartøy med god dekksplass som også

er utstyrt for å kunne utføre servicefartøyoperasjoner.

Kategorisering av servicefartøy

Utstyr, type fartøy og operasjonelle begrensninger er lagt inn i et regneark (bibliotek) for å etablere en oversikt over hvilken fartøystype som har forskjellig utstyr, samt hva som er operasjonelle begrensninger.

Hovedkomponent/-operasjon	Operasjoner med servicefartøy																				Utstyr				Type fartøy			Operasjonelle begrensninger									
	Delkomponent/-operasjon	Kran	Kran > 100 t/m	Slepe- og anker- vinsj m/fødelusning	Antenn vinsj uten fødelusning	ROV vinsj/ nottrailer ("Triplex")	Notrommel	Notblokk	Halkjeft	Styreplaner	Nokk (capstan)	Tomingsplater/ skiveholder	Opphaldredde/ sokne	ROV	Dykkeutstyr	Notvasker	Høytrykkspylere	Utstyr for kjemikalbehandling	Utstyr for oksygenering	Kastenot	Kulerekke	Sorteringsrist	Trykkluft	Lok-/røktømt	Servicefartøy <15m	Servicefartøy <24m											
Forankring/fortøyning																																					
Ankerutsetting		x		x					x	x	x	x		x																					Bollard pull ved setting av anker/dokumentere holdekraft		
Bolter - dykker		x									x				x								x											Vanndybde			
Bolter - ROV		x									x												x														
Rammefortøyning		x		x							x	x	x																								
Hanfotter		x		x							x	x	x																								
Inspeksjon fortøyning		x													x	x																					
Vedlikehold, etterstramning, reparasjon		x		x					x	x	x	x	x	x	x																						
Inspeksjon koblingsplate		x										x	x																								
Notpose																																					
Montere		x	x			x					x			x	x																				Dekksareal, krankapasitet ved løft av våt impregneret not		
Bytte		x	x			x	x				x			x	x										x	x									Dekksareal, krankapasitet ved løft av våt impregneret not, ty		
Fjerne		x	x			x	x				x																								Dekksareal, krankapasitet ved løft av våt impregneret not		
Opp- og nedliding		x									x																										
Flytekrage																																					
Montere flytekrage		x									x																										
Inpisere/vedlikeholde flytekrage		x									x																										
Montere bunnring		x	x								x																										
Heve/senke bunnring		x	x								x			x	x																						
Inpisere/vedlikeholde bunnring		x									x			x	x																						
Montere lodd		x									x																										
Heve/senke lodd		x			x						x														x	x	x									Kan utføres av lokalitetsbåt desom den har vinsj	



Modellforsøk av interaksjon mellom brønnbåt og merd i havbassenget

Det har blitt utført modellforsøk av merd og brønnbåt i havbassenget hos SINTEF Ocean. Forsøkene ble kjørt med kombinasjoner av irregulære bølger, strøm og vind.

Formålet med modellforsøkene

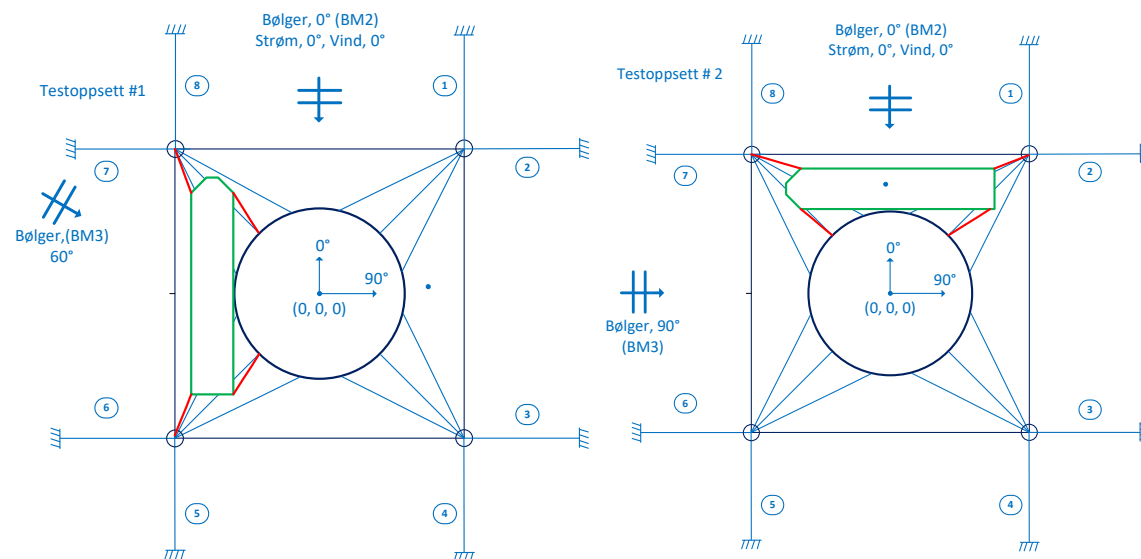
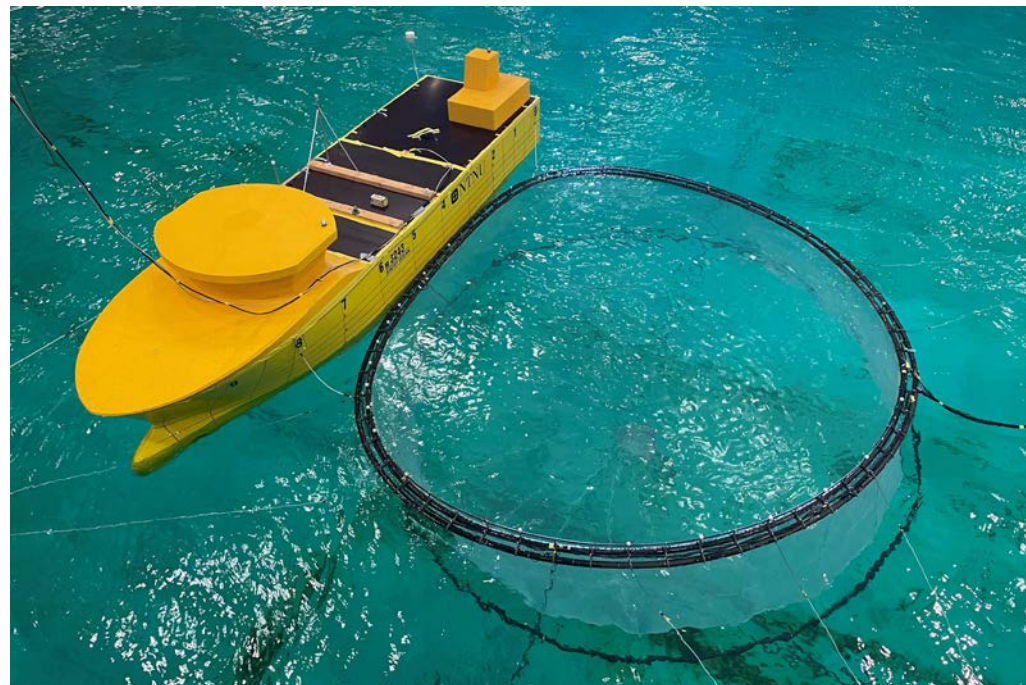
Formålet med modellforsøkene var å demonstrere, under kontrollerte omgivelser, effekten av fartøysoperasjoner ved merd, under typiske værtilstander som er vanlige på eksponerte lokaliteter. Hvilke krefter som oppstår i fortøynings- og forankringssystem og relative bevegelser mellom merd og brønnbåt. Resultatene fra forsøkene vil også bli benyttet til å validere og forbedre numeriske metoder for lastvirkning på anlegg, ref. Koblet analyse av merd og brønnbåt.

Testoppsett og modeller

Det ble benyttet modeller i skala 1:20. Modellen av brønnbåten representerte en brønnbåt med lengde 78 m, bredde 21 m, dypgang 7 m og deplasement 7400 tonn. Mermodellen, representerte en merd med 200m omkrets i fullskala, og besto av en enkelt merd i en rammefortøyning. Figurene viser de to ulike testoppsettene som ble benyttet under forsøkene, med brønnbåt i posisjon 1) på siden av merd med miljøkrefter mot baug og 2) med brønnbåt på lo side av miljøkreftene.

Nytteverdi

De numeriske modellene, som senere vil videreutvikles, vil kunne benyttes til å etablere operasjonelle grenseverdier for fartøysoperasjoner ved merd som både tar hensyn til hva utstyret tåler og mannskapets sikkerhet med tanke på bevegelser og akselerasjoner. Verdien av beslutningsstøtte i form av definerte grenser og avbruddskriterier antas å bli tydeligere i driften av eksponerte lokaliteter, ref. Operasjonsgrenser og risikofaktorer.



Forskningsområde 5 – Sikkerhet og risikostyring for menneske og anlegg



Sikkerhet og risikostyring for mennesker, fisk og oppdrettsanlegg

Utfordringer

Utvikle forbedrede strategier og systemer for risikohåndtering i fiskeoppdrett som integrerer tekniske, menneskelige og organisasjonsmessige faktorer, og som gir et systematisk grunnlag for å utvikle trygge arbeidsplasser, samt overvåking og oppfølging av sikkerhet og risiko under drift.

Forskningsoppgaver

Risikostyring: Identifisere og vurdere farer ved eksponert havbruksdrift som grunnlag for tiltak som skal forhindre, kontrollere eller redusere disse risikoene. Risikostyringen skal være helhetlig og tar for seg flere risikodimensjoner (personsikkerhet/HMS, rømming/ytre miljø, fiskevelferd og helse, strukturer/anlegg/fartøy og matvaretrygghet). Tiltak kan være organisatoriske, fysiske/tekniske, eller menneskelige/operasjonelle. Utviklingen av effektive tiltak vil bli basert på best praksis fra industri med sammenliknbar eksponeringsgrad og/eller strukturer, samt analyse av tidligere hendelser og ulykker.

Beredskap havbruk: Kunnskap om status for dagens beredskap og beste praksis for etablering av helhetlig

beredskap for eksponerte lokaliteter.

Sikkerhetsstyring ved marine operasjoner: HMS-krav og retningslinjer for arbeidsplassen under operasjoner ved oppdrettsanlegg.

Industriell relevans

Metoder, prosedyrer, retningslinjer og operasjonell praksis som blir utviklet vil bidra til sikrere drift ved eksponerte og konvensjonelle oppdrettsanlegg.

Forskningsleder:

2015-2019 Ingunn Marie Holmen [SINTEF Ocean]

2020-2023 Trine Thorvaldsen (SINTEF Ocean)



Publikasjoner og rapporter

Utne IB, Schjøberg I, Holmen IM (2015). *Reducing risk to aquaculture workers by autonomous systems and operations*. In: Safety and Reliability of Complex Engineered Systems. Podofilini B et al. (Eds). CRC Press, Switzerland. ISBN: 978-1-138-02879-1.

Holmen IM, Utne IB, Haugen S (2017). *Organisational safety indicators in aquaculture – a preliminary study*. In: Risk, Reliability and Safety: Innovating Theory and Practice -Walls, Revie & Bedford (Eds). Taylor & Francis Group, London. ISBN 978-1-138-02997-2.

Holmen IM, Utne IB, Haugen S, Ratvik I (2017). *The status of risk assessments in Norwegian fish farming*. In: Safety and Reliability – Theory and Applications – Cepin & Briš (Eds). Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-62937-0.

Holmen IM, Thorvaldsen T (2017). *Occupational health and safety in Norwegian aquaculture, National profile for a FAO report on global aquaculture OHS*. Report no. 2017:00822, SINTEF Ocean, Trondheim.

Holen, S.M., Utne, I.B., Yang, X. (2018) *Risk dimensions of fish farming operations and conflicting objectives*, Safe Societies in a Changing World: Proceedings of ESREL 2018, June 17-21, 2018, Trondheim, Norway, CRC Press LLC.

Holmen IM, Utne IB, Haugen S (2018). *Risk assessments in the Norwegian aquaculture industry: Status and improved practice*. Aquacultural Engineering 83: 65-75.

Holmen IM, Salomonsen C, Thorvaldsen T, Holen SM (2018). *Anbefalinger for sikre arbeidsplasser i havbruk*. Rapport no. 2018:00096, SINTEF Ocean, Trondheim.

Jin, J.Z., Selvik Ø., Yin, D., Yang, X., Aksnes, V.Ø. (2018) *Review on Typical Marine Operations in Aquaculture and Numerical Simulation of One Example Operation Scenario*. I: The Proceedings of The Twenty-eighth (2018) International OCEAN AND POLAR ENGINEERING CONFERENCE, ISOPE 2018. International Society of Offshore & Polar

Engineers 2018 ISBN 978-1-880653-87-6. s. 1343-1352. SINTEF Ocean, NTNU.

Utne, I.B., Schjøberg, I., Sandøya, S., Yang, X., Holmen, I.M. (2018) *Reducing risk in aquaculture through autonomous underwater operations*. In Probabilistic Safety Assessment and Management PSAM 14 , Los Angeles, USA.

Yang, X., Utne, I.B., Holmen, I.M. (2018) *Review of hazard identification techniques for autonomous operations in Norwegian aquaculture*. In Probabilistic Safety Assessment and Management PSAM 14 , Los Angeles, USA.

Yang, X., Utne, I.B., Holen, S.M., Holmen, I.M. (2018) *Implications from major accident causation theories to activity-related risk analysis - An application in Norwegian Atlantic salmon farming industry*, Safe Societies in a Changing World: Proceedings of ESREL 2018, June 17-21, 2018, Trondheim, Norway, CRC Press LLC.

Holen, S.M., Yang, X., Haugen, S., Utne, I.B. (2019) *Major accidents in Norwegian fish farming*. Safety Science 120, 32-43.

Zhen, X., Vinnem, J. E., Yang, X. & Huang, Y. (2019). *Quantitative risk modelling in the offshore petroleum industry: integration of human and organizational factors*. Ships and Offshore Structures.

Yang, X., Ramezani, R., Lader, F.P, Mosleh, A. & Utne, I. B. (2020). *Operational limits for aquaculture from a risk and safety perspective*. Reliability Engineering and Systems Safety, 204 107208.

Yang, X., Utne, I. B., Sandøy, S.S, Ramos, M.A. Rokseth, B. (2020). *A systems-theoretic approach to hazard identification of marine systems with dynamic autonomy*. Ocean Engineering, 217 107930.

Yang, X., Utne, I. B., & Holmen, I. M. (2020). *Methodology for hazard identification in aquaculture operations (MHIAO)*. Safety Science, 121, 430-450.

Holmen, IM, Utne, IB, Haugen S (2021) *Identification of safety*

indicators in aquaculture operations based on fish escape report data. Aquaculture, 544, 737143.

Yang, X., Holmen, I. M., & Utne, I. B. (2022). *Scenario analysis of fish escapes in Norwegian aquaculture for implementation of barrier management and improved learning from accidents*. Marine Policy, 143, 105208.

Holmen IM (2022) *Safety in Exposed Aquaculture Operations Strategies and methods for reducing risk*. Thesis for the degree of Philosophiae Doctor, Doctor theses at NTNU, 2022:73

Neis, B., Wenzhao, G., Cavalli, L., Thorvaldsen, T., Holmen, IM., Jeebhay, MF., Lopez Gomez, MA., Ochs, C., Watterson, A., Beck, M., Tapia-Jopia, C. (2023) *Mass mortality events in marine salmon aquaculture and their influence on occupational health and safety hazards and risk of injury*. Aquaculture, 566, 739225.



Oversikt

Populærvitenskapelige publikasjoner og nyheter

Holmen IM (intervju). *Ser en bedring i sikkerhetsarbeidet i oppdretsnæringen*. Intrafish. 18. april 2016.

Holmen IM og Utne IB. *Regelrett risiko?* Kronikk i Fiskeribladet/Fiskaren, 7. desember 2016.

Holmen IM. *Risikovurdering av havbruksoperasjoner*. Norsk Fiskeoppdrett nr 9/2018.

Holmen IM, Utne IB, Schjøllberg I, Sandøy SS, Haugaløkken BOA, Yang X (2019) *Det er mange farer på et oppdrettsanlegg: Hvordan kan vi redusere risikoen i operasjonene?* Norsk fiskeoppdrett 11-2019, 30-33

Holmen IM (intervju). *Enorme dødstall i fiskeri og havbruk – dette er Norges farligste yrker*. Fiskeribladet, 7. oktober 2019.

Holmen IM (intervju). *35 dødsulykker i norsk havbruk på 36 år*. Intrafish, 2. oktober 2019.

Holmen IM (intervju) *Fiskeri og havbruk er Norges farligste yrker*. Intrafish, 3. oktober 2019.

Holmen IM (intervju). *39 alvorlige ulykker i norsk havbruk*. Intrafish, 5. februar 2020.

Holmen IM (intervju). *Antall ulykker i oppdrettsnæringen har økt nesten 60 prosent på seks år*. Fiskeribladet, 7. februar 2020.

Riise AL, Hurum KV, Bergan L, Hoaas K, Husby H, Holmen IM (intervju). *Antallet arbeidsulykker fyker i været, men går ned hos de største oppdretterne*. Intrafish, 21. februar 2020.

Østdahl AB, Holmen IM. Informasjonsfilm: Rapport om svært alvorlig sjøulykke - Multi Vision, dødsulykke i forbindelse med fortøyning av fartøy ved oppdrettsanlegg utenfor Frøya, 1. januar 2022. Statens

havarikommisjon 13. juni 2022. <https://youtu.be/0Q8lcpR5ohM>

Holmen IM og Thorvaldsen T (2022) *Sikkerheten i havbruksnæringa må styrkes*. Kronikk, Adresseavisen/Midtnorsk debatt.

Vatlestad J, Holmen IM, Thorvaldsen T (intervju) *Antall arbeidsulykker i norsk oppdrett øker: Ansatte setter egen sikkerhet til side for å gjennomføre planlagte operasjoner*. Intrafish 20. juni 2022.

Thorvaldsen T og Holmen IM (2022) *Hvordan oppnår vi nullvisjonen for ulykker til havs?* Kronikk, Fiskeribladet.

Masteroppgaver

Nordtvedt, Helene (2016). *Development of a Risk Model for Fish Farming Operations*. Institutt for produksjons- og kvalitetsteknikk, NTNU.

Sæbø, Solveig (2017). *Integrering av ytre miljørisiko i HMS-arbeidet - En casestudie av et fiskeoppdrettselskap*. Institutt for teknologi og sikkerhet, UiT Norges Arktiske Universitet.

Dybsland, Odin (2017). *Risikostyringsverktøy for oppdrettsnæringen*. Institutt for marin teknikk, NTNU.

Woll, Gøran Bredahl (2018). *Sertifiserer de seg sikrere?* Institutt for teknologi og sikkerhet, UiT Norges Arktiske Universitet.

Bondevik, Håkon Lund (2019). *Fish Escape and Models to Assess Influential Factors*. Institutt for marin teknikk, NTNU.

Andreassen, Atle og Vegard Olsen (2019). *Sikkerhetsrevisjon i oppdrettsnæringen. En kvalitativ studie av overførbarheten til Operasjonell Tilstand Sikkerhet (OTS)*. Institutt for industriell økonomi og teknologiledelse, NTNU.

Andersen, Dani (2021). *Risk-based design of operational vessel for exposed aquaculture*. Institutt for marin teknikk, NTNU.

Nesje, Jørgen (2022) *Change in risk picture by going from a conventional sea cage to a submersible cage concept in Norwegian fish farming*. Institutt for marin teknikk, NTNU.

Gumdal, Ingeborg Sofie (2022). *Sikkerhet i kran- og løfteoperasjoner. Hvordan kan man bedre personsikkerheten i kran- og løfteoperasjoner i havbruksnæringen?* Institutt for industriell økonomi og teknologiledelse, NTNU.



Reduksjon av risiko i havbruk

-Operasjonelle grenser i et risikoperspektiv

VEILEDERE

Professor Ingrid B. Utne (NTNU)

PERIODE

Q2 2017 – Q2 2019

Hovedmålet med prosjektet er å utvikle en metode som identifiserer operasjonelle grenser for havbruksoperasjoner fra et risikoperspektiv. Dette vil sikre tilgang til oppdatert informasjon om risiko som beslutningsstøtte i operasjonsplanleggingen.

Fem risikodimensjoner bør vurderes på en helhetlig måte i marine operasjoner. Disse dimensjonene er risiko for personell, risiko for fiskevelferd, risiko for miljøet, risiko for materielle verdier og risiko for mattrygghet.

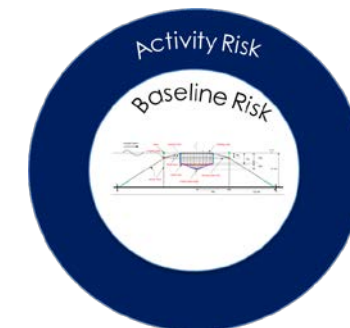
I dag baseres valg som tas under havbruksoperasjoner i stor grad på mannskapets erfaringer. Personellet på stedet bestemmer når operasjonen startes, og om operasjoner skal utsettes eller avbrytes, hovedsakelig basert på værforhold og sjøtilstand.

Operasjonell risiko er påvirket av mange andre operasjonelle aspekter, inkludert tilstanden til servicefartøyet, tilstanden til oppdrettsanlegget, arbeidsrutinene og -

metodene, mannskapet og det fysiske miljøet.

Vanligvis blir disse implisitt vurdert av erfarne operatører, men dersom alle risikoaspektene skal vurderes, vil kunnskaps- og erfaringsoverføringen mellom områdene bli svært krevende.

I tillegg vil tekniske, operasjonelle og geografiske forskjeller mellom oppdrettsanleggene være kilde til forskjellige farer og faktorer som påvirker risikonivået. Eksplisitt kunnskap om disse farene, risikoene og risikofaktorene er avgjørende for å kunne ta beslutninger som ivaretar sikkerheten i operasjonene.



Artikler:

Yang, X., Holmen, I. M., & Utne, I. B. (2022) *Scenario analysis of fish escapes in Norwegian aquaculture for implementation of barrier management and improved learning from accidents*. Marine Policy, 143, 105208.

Yang, X., Utne, I. B., & Holmen, I. M. (2020) *Methodology for hazard identification in aquaculture operations (MHIAO)*. Safety Science, 121, 430-450.

Holmen IM, Utne IB, Schjølberg I, Sandøy SS, Haugaløkken BOA, Yang X (2019) *Det er mange farer på et oppdrettsanlegg: Hvordan kan vi redusere risikoen i operasjonene?* Norsk fiskeoppdrett 11-2019, 30-33

Holen, S.M., Yang, X., Haugen, S., Utne, I.B. (2019) *Major accidents in Norwegian fish farming*. Safety Science 120, 32-43.

Zhen, X., Vinnem, J. E., Yang, X. & Huang, Y. (2019). *Quantitative risk modelling in the offshore petroleum industry: integration of human and organizational factors*. Ships and Offshore Structures.

Yang, X., Ramezani, R., Lader, F.P., Mosleh, A. & Utne, I. B. (2020). *Operational limits for aquaculture from a risk and safety perspective*. Reliability Engineering and Systems Safety, 204 107208.

Yang, X., Utne, I. B., Sandøy, S.S., Ramos, M.A., Rokseth, B. (2020). *A systems-theoretic approach to hazard identification of marine systems with dynamic autonomy*. Ocean Engineering, 217 107930.

Utne, I.B., Schjølberg, I., Sandøya, S., Yang, X., Holmen, I.M. (2018) *Reducing risk in aquaculture through autonomous underwater operations*. In Probabilistic Safety Assessment and Management PSAM 14, Los Angeles, USA.

Yang, X., Utne, I.B., Holmen, I.M. (2018) *Review of hazard identification techniques for autonomous operations in Norwegian aquaculture*. In Probabilistic Safety Assessment and Management PSAM 14, Los Angeles, USA.

Yang, X., Utne, I.B., Holen, S.M., Holmen, I.M. (2018) *Implications from major accident causation theories to activity-related risk analysis - An application in Norwegian Atlantic salmon farming industry*, Safe Societies in a Changing World: Proceedings of ESREL 2018, June 17-21, 2018, Trondheim, Norway, CRC Press LLC.

Holen, S.M., Utne, I.B., Yang, X. (2018) *Risk dimensions of fish farming operations and conflicting objectives*, Safe Societies in a Changing World: Proceedings of ESREL 2018, June 17-21, 2018, Trondheim, Norway, CRC Press LLC.

Jin, J.Z., Selvik Ø., Yin, D., Yang, X., Aksnes, V.Ø. (2018) *Review on Typical Marine Operations in Aquaculture and Numerical Simulation of One Example Operation Scenario*. I: The Proceedings of The Twenty-eighth (2018) International OCEAN AND POLAR ENGINEERING CONFERENCE, ISOPE 2018. International Society of Offshore & Polar Engineers 2018 ISBN 978-1-880653-87-6. s. 1343-1352. SINTEF Ocean, NTNU.



Sikkerhet og risikostyring i eksponerte havbruksoperasjoner

VEILEDERE

Professor Ingrid B. Utne (NTNU)
Professor Stein Haugen (NTNU)

PERIODE

Q1 2016 – Q4 2021
Disputert 2022

Havbruksoperasjoner gjennomføres allerede på grensa av hva fisk, utstyr og personell tåler. Erfaringer fra ulykkesgranskinger og tidligere forskning, synliggjør at det er mangelfull kunnskap om risikofaktorene som kan føre til rømming av fisk eller ei arbeidsulykke.

Målet med PhD-prosjektet har vært å bidra med ny kunnskap om hvordan risiko forbundet med havbruksoperasjoner kan reduseres. Servicefartøyene er en sentral ressurs og de er ansvarlige for flere av operasjonene som innebærer høy risiko, f.eks. fortøyningsarbeid, arbeid på koplingsplater og heving av bunnring. Drift av havbruksanlegg baserer seg fortsatt på manuelle operasjoner som stiller store krav til erfaring og kompetanse hos den enkelte ansatte.

Sikkerhetsstyringen på oppdrettsanleggene og servicefartøyene har vært studert. Viktige risikofaktorer er identifisert, og omfatter bl.a. arbeidspraksis, opplæring og vedlikeholdsrutiner. Praksis for risiko-vurderinger er også beskrevet, sammen med anbefalinger for forbedringer.

Rømming av oppdrettsfisk har vært brukt som casestudie i doktorgradsarbeidet. Resultatene gir ny kunnskap om faktorene og forholdene som påvirker risikoen for rømming av fisk under operasjoner på et oppdrettsanlegg. Årsakskjeder og scenarier for rømming er beskrevet, og disse kan benyttes til å forbedre både rapportering og granskning av rømmingshendelser. En helhetlig forståelse av rammebetingelsene for fiskeoppdrettsnæringa som arbeidsplass og produksjonsanlegg for mat, er nødvendig for å utvikle styringssystemer som effektivt fanger opp og håndterer forhold som setter sikkerheten i fare. Avhandlinga gir anbefalinger om praktiske tiltak og tilnærminger for sikkerhetsstyring som oppdrettsselskapene kan ta i bruk i daglige operasjoner og i opplæringen av personell.



Internkontrollsløyfa



Artikler:

Holmen IM, Utne IB, Haugen S [2017]. Organisational safety indicators in aquaculture – a preliminary study. In: Risk, Reliability and Safety: Innovating Theory and Practice -Walls, Revie & Bedford (Eds). Taylor & Francis Group, London. ISBN 978-1-138-02997-2.

Holmen IM, Utne IB, Haugen S, Ratvik I [2017]. The status of risk assessments in Norwegian fish farming. In: Safety and Reliability – Theory and Applications – Cepin & Briš (Eds). Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-62937-0.

Holmen IM, Thorvaldsen T [2017]. Occupational health and safety in Norwegian aquaculture, National profile for a FAO report on global aquaculture OHS. Report no. 2017:00822, SINTEF Ocean, Trondheim.

Holmen IM, Utne IB, Haugen S [2018]. Risk assessments in the Norwegian aquaculture industry: Status and improved practice. Aquacultural Engineering 83: 65-75.

Holmen IM, Utne IB, Haugen S [2021] Identification of safety indicators in aquaculture operations based on fish escape report data. Aquaculture, 544, 737143.

Yang, X., Holmen, I. M., & Utne, I. B. [2022]. Scenario analysis of fish escapes in Norwegian aquaculture for implementation of barrier management and improved learning from accidents. Marine Policy, 143, 105208.

Holmen IM [2022] Safety in Exposed Aquaculture Operations: Strategies and methods for reducing risk. Thesis for the degree of Philosophiae Doctor, Doctor theses at NTNU, 2022:73

P4 Sikkerhet i havbruksoperasjoner



PROSJEKTLEDER	PARTNERE INVOLVERT	PERIODE	TYPE FORSKNING
Ingunn M. Holmen (SINTEF Ocean)	SalMar, Cermaq, Marine Harvest, Anteo, Aqualine, AQS, Lerow, DNV, Kongsberg Maritime Merchant Marine, MacGregor, NTNU IMT, SINTEF Ocean	Q2 2015 – Q4 2018	Grunnleggende

Prosjektet har hatt som mål å forbedre sikkerheten i operasjoner ved eksponerte oppdrettsanlegg. Dette har etablert grunnlaget for å utvikle helhetlige risikostyringssystemer for materielle verdier, fiskevelferd, ytre miljø, rømming og HMS.

Prosjektaktivitetene har fokusert på forhold som har betydning for den operasjonelle sikkerheten i havbruk. Dette er blant annet farer i serviceoperasjoner, risikovurderinger, opplæring og kompetansekrav. Resultatene er i to kategorier: Kunnskap som industrien kan ta i bruk med en gang, og det som det må sørges for på lengre sikt når oppdrettsnæringen går mer eksponert.

Innledende studier viste at det er en lav grad av standardisering mellom selskaper og fartøy hva både design/utrusting og arbeidsprosedyrer angår. Standardisering kan være et sikkerhetstiltak. Dette gjør det også enklere å utveksle personell mellom lokalitetene uten at det i seg selv blir en risikofaktor.

Den teknologiske utviklingen gjør at selskapene trenger mer spesialisert fagkompetanse på noen områder. Selskapene melder i dag om at operasjonene i noen tilfeller må tilpasses det mannskapet som er tilgjengelig. Dette er bakgrunnen for at det ble startet et arbeid med å utarbeide anbefalte kompetansekrav for havbrukspersonell.

Operasjonsplanlegging blir stadig viktigere for å sikre at nødvendige ressurser og personell er tilgjengelig. Gode rutiner for risikovurderinger og sikker-jobb-analyse vil bidra til at de potensielle farene i operasjonen er kjent for alle involverte, og tiltak kan iverksettes for å redusere operasjonell risiko.



Resultater:

- Risikovurdering av havbruksoperasjoner
- Kompetansekrav
- Beste praksis i havbruksoperasjoner

Innovasjonspotensiale:

- Resultatene gir ny kunnskap om risikofaktorer i havbruksoperasjoner, som en basis for å utvikle sikkerhetsbarrierer ut fra et helhetlig risikoperspektiv.

Assosierte prosjekter:

- [Safer workplaces and fish farming](#). Forskerprosjekt HAVBRUK2 2016-2019 (SINTEF Ocean)
- [Reducing risk in aquaculture](#). Forskerprosjekt HAVBRUK2 2016-2019 (NTNU)

Risikovurdering av havbruksoperasjoner

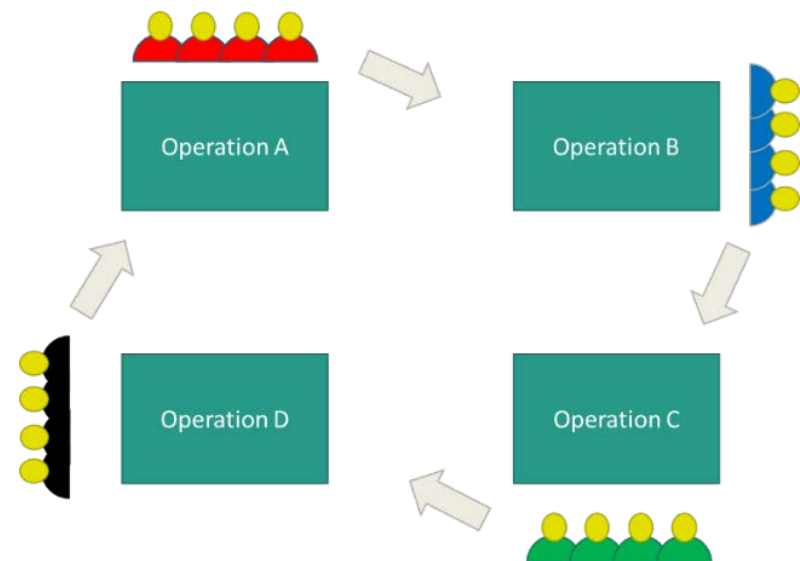
Ved å gjennomføre grundige risikovurderinger er mannskapet bedre rustet til å forebygge uønskede hendelser som kan føre til personulykker, rømming eller skade på fisk, materiell og miljø.

Risikovurderinger er lovpålagt og skal gjøres blant annet for fiskevelferd og -helse, mattrygghet, miljøpåvirkning, rømming av fisk, fartøy, HMS. Det er fem myndigheter som har tilsynsansvar for hver sine områder: Fiskeridirektoratet, Mattilsynet, Arbeidstilsynet, Fylkesmannen/miljømyndighetene, Sjøfartsdirektoratet. Det skal gjøres nye risikovurderinger dersom det gjøres endringer i produksjonsutstyr, bemanning eller prosedyrer. Våre analyser viser at det er store forskjeller mellom selskapene i hvor godt kravene til risikovurderinger er implementert. Et positivt funn er at sikker jobb-analyse er i ferd med å bli innført som standardprosedyre i stadig flere selskaper.

Internkontrollforskriften setter krav til involvering fra alle ansatte i risikovurderingene. "Workshop-metoden" ble utviklet i samarbeid med EXPOSED-partnerne for å ivareta dette (illustrert i figuren til høyre). Operativt personell settes sammen i grupper og starter med å beskrive hver sin operasjon steg for steg, inkludert verktøy/utstyr som brukes. Gruppene roterer så til neste bord/operasjon. Når alle gruppene har jobbet med alle operasjonene, er

resultatet utførlige prosedyrebeskrivelser for hver operasjon. Neste oppgave er å identifisere alle farer forbundet med stegene i operasjonen, inkludert risikoreducerende tiltak. Vår anbefaling er at risikovurderingene ferdigstilles og "renskrives" av ei mindre arbeidsgruppe. De ansatte på fartøy og oppdrettsanlegg bør som et minimum delta i arbeidet med å beskrive operasjonene og farene, slik at de er godt kjent med risikoene i arbeidsmiljøet. Denne framgangsmåten ble utprøvd med godt resultat i fire arbeidsmøter i 2015 og 2016. Arbeidet oppsummert i internasjonale artikler (Holmen m. fl 2017 og 2018).

En masteroppgave fra UiT (Bredahl 2018) konkluderer med at de selskapene som innfører sertifiseringer (ASC, GLOBALG.A.P.), også ser en positiv effekt på sikkerhetsarbeidet i selskapet. Dette gjelder både den praktiske implementeringen og involveringen av alle ansatte. Årsaken er at hele kvalitetssikringssystemet oppgraderes i forbindelse med sertifiseringsprosessen hvor virksomheten gjennomgår en grundig ekstern revisjon.



Kompetansekrav

Årsaksanalyser av tidligere hendelser og ulykker i havbruksnæringa, både personulykker og rømminger, viser at "mangelfull opplæring" ofte er en medvirkende årsak. God opplæring av mannskapet er derfor et viktig sikkerhetstiltak.

Arbeidernes kunnskaper og ferdigheter kan være avgjørende for om en operasjon gjennomføres slik at sikkerheten ivaretas for folk, miljø og fisk. Dagens situasjon er at oppdrettsnæringa har behov for ansatte med kunnskaper og ferdigheter utover de formelle kvalifikasjonskravene som følger av nåværende regelkrav til opplæring og kompetanse for personell på matfiskanlegg og havbruksfartøy. Disse er å finne i Arbeidsmiljøloven, Skipssikkerhetsloven og Akvakulturloven med tilhørende forskrifter. "Forskrift om kvalifikasjoner og sertifikat for sjøfolk" har vært endret, og det har kommet to nye kompetansesertifikat (D6 og D7) for mannskap på havbruksfartøy.

Opplæring og kompetansekrav i havbruksoperasjoner var tema i EXPOSED i 2017. En kartlegging viste at oppdretts- og servicefartøyselskapenes prosedyrer

dekket de formelle kravene, men de hadde også selskapsinterne krav som var strengere enn regelverket. Eksempler er dokumentert opplæring i kranbruk om bord i fartøy og båtførerprøven, i påvente av at nytt sertifikatkrav ennå ikke var på plass. Flere hadde også IMO50 sikkerhetskurs for mannskap på fartøy, selv om dette ikke var et formelt krav.

Basert på diskusjoner og innspill i arbeidsmøter i EXPOSED, samt selskapenes daværende prosedyrer, ble det i 2018 utarbeidet en anbefaling som inneholder krav til generell kompetanse og ferdigheter, samt spesifikke krav for arbeid på fortøyningsystem, arbeid på not, kranoperasjoner/tunge løft, og håndtering av fisk.



Beste praksis i havbruksoperasjoner

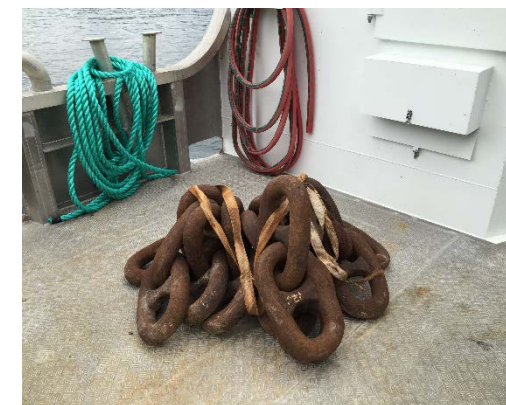
Fiskeoppdrett kjennetegnes av krevende operasjoner som er sårbare for skiftende vær, vind og strøm og har utfordringer når det gjelder sikkerhet for folk, fisk, miljø og materiell. Et forebyggende tiltak kan være å etablere en felles, beste praksis i næringa.

Ulykkesstatistikken for personskader og rømming av fisk viser at risikoen er særlig høy under fortøyningsarbeid, kranoperasjoner og ved arbeid på not. Servicefartøyene er en sentral ressurs og har spesialisert seg på flere av disse operasjonene. Arbeidsbåtene i anlegget utfører også vedlikehold og inspeksjoner som innebærer bruk av kran, nokke og vinsj.

Fartøyene er gjerne ulike i design og størrelse, og utrustet forskjellig, noe som i seg selv ikke støtter en standard praksis. Situasjonen blir ekstra utfordrende dersom innleid eller nytt mannskap ikke er opplært i den lokale måten å gjøre det på. Et godt sikkerhetstiltak kan da være å etablere en felles, beste praksis for gjennomføring av krevende operasjoner. Prosedyrene for "beste praksis" bør beskrive tilstrekkelige og effektive

sikkerhetstiltak basert på en risikovurdering, og være kjent for alle ansatte på anlegget og innleide fartøy.

I et arbeidsmøte i 2018 ble operativt personell fra EXPOSED-partnerne invitert til å utveksle erfaringer med risikovurderinger og opplæring av personell. I tillegg ble det utarbeidet et forslag til beste praksis for tre utvalgte serviceoperasjoner. Disse var: 1) Arbeid på koblingsskiver – heving av koblingsskive; 2) Ankerhåndtering – utsetting av anker; 3) Heve bunnring.



Flåte for eksponerte lokaliteter (2020)

Fôrflåten er en sentral konstruksjon i dagens sjøbaserte oppdrett, som har mange funksjoner; ensilasjesystem, drift av fôringsystem, lagring av fôr, innkvartering og kontrollrom, energigenerering osv. Mer krevende miljøforhold kan endre kravene til utforming og design av flåter. Vi har jobbet med anbefalinger til videre arbeid og til fremtidens "flåte" for eksponerte lokaliteter.

Arbeidet med flåte inkluderte regelverkskrav for flåter, flåter på markedet, intervju med ansatte og arbeidsmøte med Exposed-partnere.

ScaleAQ og AKVA group er to ledende leverandører av flåter i dag. Flåtene er tilpasset eksponeringsgraden for dagens lokaliteter, og sertifisert av DNV i henhold til NYTEK-forskriften og NS9415:2009. Se figur 1 for tekniske krav.

Intervju med ansatte viste at de stort sett var veldig fornøyd med flåtene. Noen ansatte ønsket seg større ensilasjekapasitet, flere fôringslinjer og fôringskapasitet. Noen hadde to flåter på lokaliteten, med ulike funksjoner.

Arbeidsmøte om flåte tok for seg oppdretternes perspektiv, sertifisering og risikovurderinger og flåte fra teknologileverandørenes ståsted. Flere utfordringer ble identifisert, blant annet: entring av flåte fra båt, håndtering av ensilasje, ujevn tømning av siloer og etterlevelse av Arbeidsmiljølovens krav til fasiliteter for overnatting.

Anbefalinger for videre arbeid med flåte bør fokusere på regelverk, ujevn tømning av siloer og kregning, utforming av flåter for eksponert lokalitet, digitalisering, beslutningsstøtte og overvåkning.



Foto: A. Misund, SINTEF Ocean



Figur 1: Tekniske krav til fortøyninger og flåte.

Operasjonsgrenser og risikofaktorer (2020)

Operasjonsgrenser, grenseverdier og beslutningsstøtte, er begrep og tema som har vært en gjengangere i tidligere EXPOSED-prosjekter. I dette arbeidet inngår kunnskapsstatus fra tidligere studier og kartlegginga av erfaringer fra oppdretternes ståsted. Eksempler fra andre næringers tilnærming til operasjonsgrenser har også vært belyst.

Tidligere studier viser at både store operasjoner og daglig tilsyn er sårbare for værforhold. Risikofaktorer i planlegging og gjennomføring av operasjoner kan knyttes til vær, anlegg, operasjoner og mannskap (Yang et al. 2020). Det gjøres få objektive målinger. I tillegg til værmeldinger, støtter man seg på skjønn og erfaring når man vurderer hvor grensen går.

Arbeidsmøte om operasjonsgrenser og risikofaktorer bekrefter at det er svært vanlig med møter som samler ansatte i forkant av operasjoner. I disse møtene vurderes lokale vær- og miljøforhold før en endelig avgjørelse om oppstart tas. Avbruddskriterier kan være knyttet til: strøm, oksygen, sikt, vind, bølger og skader på fisk (rødbuk/skjelltap). Det er et ønske om objektive vurderinger av vind og bølgehøyde på hver enkelt lokalitet.

I luftfart opererer man etter gitte operasjonelle grenser på grunnlag av et gitt risikobilde (vind, sikt). Planleggingsprinsipper fra marine operasjoner som "sikker tilstand" (normal risiko) og "point of no return" kan være relevante for havbruksoperasjoner som for eksempel avlusninger. I løpet av en operasjon kan man også definere sikre tilstander som f.eks. nødhavn.

Operasjonsgrenser må hensynta både folk, fisk, utstyr og miljø og verdien av beslutningsstøtte i form av definerte grenser og avbruddskriterier vil bli enda tydeligere i driften av eksponerte lokaliteter.



Hvor ille skal været være før oppdrettsarbeiderne holder seg på land?

Vinterstormene er på vei. I uvær og røff sjø, er det oppdrettsselskapene selv som bestemmer om det er forsvarlig å dra ut på sjøen for å jobbe på merdene.

23. november 2020 5:00 OPPDATERT 28. november 2020 10:15

Av [Ole Jacob Strønen Riise](#) i Bergen

Figur 1: Oppslag i Intrafish 23.11.2020

Beredskap (2020-2023)

I rapporten *Havbruk til havs* (Regjeringen 2019) fremheves behovet for et betydelig større fokus på beredskap som følge av økte avstander til land, økt mengde fisk, døgnbemanning, fjernstyring og automatisering og mer krevende logistikk. Algeangrepet våren 2019 synliggjorde også viktigheten av en helhetlig beredskap på dagens lokaliteter.

Arbeidet med flåte inkluderte litteratur- og dokumentstudie, regelverkskrav, intervju med ansatte og arbeidsmøte med EXPOSED-partnere.

Flere regelverk stiller krav til beredskap på ulike områder (se figur 1), og en helhetlig tilnærming, som omhandler både personsikkerhet, fiskevelferd, utstyr og miljø ble lagt til grunn.

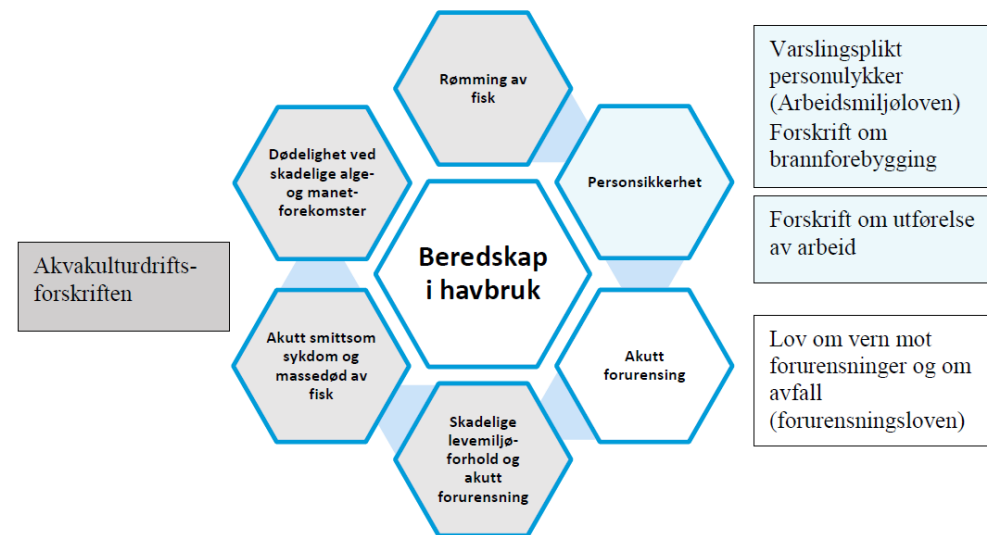
Arbeidsmøte om beredskap omhandlet status for dagens beredskap, erfaringsoverføring fra andre næringer og diskusjoner omkring status og behov. Forebyggende tiltak er viktig for oppdretterne, og det finnes både sentrale og lokalitetsspesifikke beredskapsplaner knyttet til definerte ulykkeshendelser. Basert på erfaringer fra andre næringer kan mer gjøres på samarbeid og læring på tvers av selskap,

systematisering, forenkling og forankring.

Intervju med ansatte viser at beredskapsplaner er i stadig endring, noe som kan føre til at de blir stadig mer omfattende.

Arbeidet viser at mye fungerer fint i dagens beredskap, samtidig som det er rom for forbedringer. På mer eksponerte lokaliteter, og i nye konsept, kan utfordringene endre seg. Basert på aktivitetene i Exposed anbefales det å utarbeide en veileder for etablering av beredskap på tvers av myndighetsområder.

Arbeidet med å utarbeide veilederen fortsatte i 2021- 2022. Safetec og DNV utarbeidet veilederen i samarbeid med SINTEF Ocean, og den ble utgitt i 2023.



Figur 1 Sentrale regelverkskrav for beredskap i havbruksnæringa.

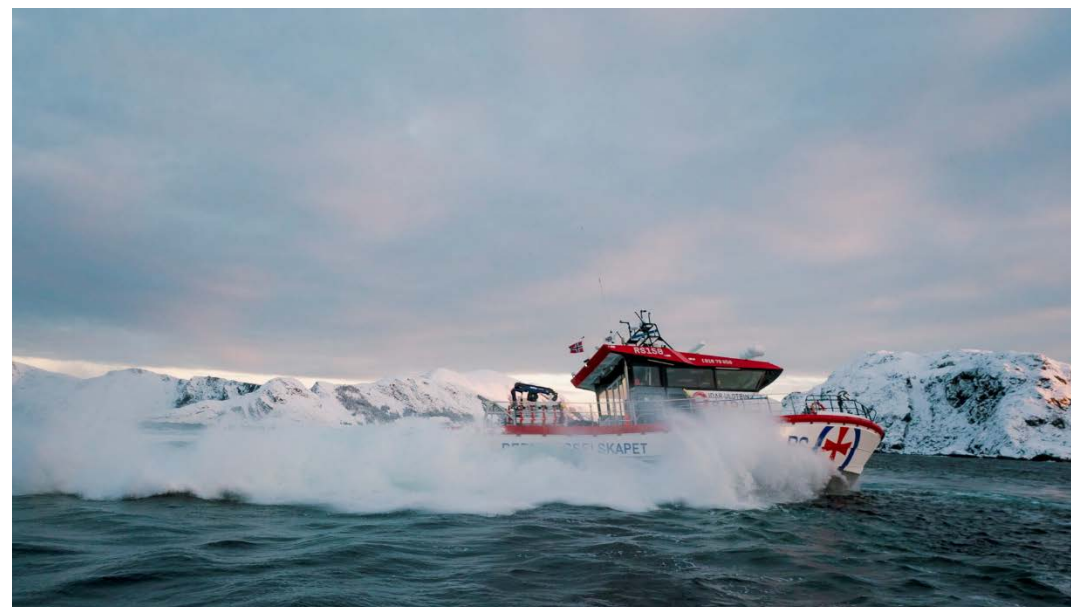


Foto: Redningsselskapet



Veileder Beredskapsanalyse for havbruk ble utgitt i mars 2023. Veilederen ser på hele beredskapsprosessen, med hovedvekt på beredskapsanalysen. Veilederen er utarbeidet av Safetec (ved Stine Albertsen Ranum) og DNV (ved Petter Trædal) i samarbeid med SINTEF Ocean (Trine Thorvaldsen og Cecilie Salomonsen).



Helhetlig risikostyring og avlusning som case (2021)

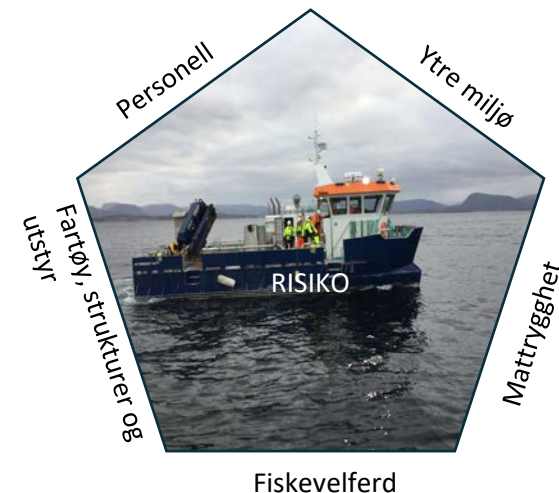
Dette arbeidet har gitt økt kunnskap om hvordan ulike risikofaktorer håndteres under avlusning, og hvordan avgjørelser knyttet til en risikodimensjon kan påvirke sikkerhetsnivået i andre områder.

Avlusningsoperasjoner er et relevant case for å studere helhetlig risikostyring, fordi oppdretterne må håndtere en rekke farer samtidig. Farer relatert til følgende risikodimensjoner er vurdert: personsikkerhet, rømming/ytre miljø, fiskevelferd og helse, strukturer/anlegg/fartøy og matvaretrygghet (Yang et al. 2020). Arbeidet har i særlig grad tatt for seg fiskevelferd og helse, gjennom egne samtaler med fiskehelsepersonell, drifts – og lokalitetsledere hos oppdretterne.

I november 2021 gjennomførte vi et arbeidsmøte med partnerne, hvor vi diskuterte de ulike risikodimensjonene ut fra en omforent stegvis beskrivelse av avlusningsoperasjoner. Gjennomgangen hadde søkelys på

farer og tiltak før, under og etter avlusning, og forutsatte gjennomføring med ikke-medikamentell metode for avlusning (mekanisk, termisk eller ferskvann/avsaltet sjøvann) som involverer trening av fisk før pumping om bord i brønnbåt eller lekter.

Diskusjonene viste at hensyn til fiskehelse- og velferd veier tungt i avlusningsoperasjoner. Under operasjonen har man døgnbemanning og været vurderes kontinuerlig. En ny utfordring er at noen slakterier ikke har ventemerdd, som igjen påvirker logistikken. Slaktebåt er også mer vanlig, og forutsetter lengre værvindu på lokalitet.



Figur 1 Risikodimensjoner for helhetlig risikostyring i havbruksoperasjoner.

Yang, X., Utne, I. B., & Holmen, I. M. (2020). *Methodology for hazard identification in aquaculture operations (MHIAO)*. Safety Science, 121, 430-450.



Foto: Rostein AS

Sikkerhet og risikostyring i eksponerte havbruksoperasjoner

Resultater fra SFI EXPOSED 2015-2023 (2023)

Denne rapporten er en oppsummering av arbeidet i forskningsområdet "Sikkerhet og risikostyring" i SFI EXPOSED. Risikobildet som er beskrevet, viser at mer kan gjøres for å bedre sikkerheten i havbruk.

Sikkerhetsutfordringer på lokaliteter som brukes i dag, må håndteres i driften av nye anleggskonsepter lenger fra land, eller på lokaliteter som er spesielt eksponert for vind, bølger og strøm. Sikkerheten i havbruksoperasjoner kan forbedres ved å innføre forebyggende strategier og tiltak.

Dette er tiltak som reduserer belastningen og bedrer arbeidsmiljøet for den enkelte arbeidstaker, kontrollerer risiko i operasjonene ved å fjerne farer eller redusere konsekvensen av uønskede hendelser, sikrer forsvarlig opplæring og robust organisering av arbeidet, velfungerende beredskap og sikkerhetsbarrierer som en del av

designprosessen.

Rapporten peker videre på behovet for en helhetlig tilnærming til risiko, og presenterer en forbedret metode for risikovurderinger, diskuterer operasjonsgrenser, avbruddskriterier og sikkerhetsindikatorer som beslutningsstøtte for eksponert oppdrett og havbruk til havs.

Referanse:

Holmen IM, Thorvaldsen T, Salomonsen C, Lona E (2023) Sikkerhet og risikostyring i eksponerte havbruksoperasjoner Resultater fra SFI Exposed 2015-2023. SINTEF Rapport 2023:00241.



Foto: T. Thorvaldsen, SINTEF Ocean



Forskningsområde 6 – Fiskeadferd og -velferd ved mer eksponert oppdrett

Fiskeadferd og –velferd ved mer eksponert oppdrett

Utfordringer

Studere fiskens atferd, vekst og velferd under typiske forhold for eksponerte lokaliteter, samt når fisken utsettes for nye driftsløsninger tilpasset eksponerte forhold.

Forskningsoppgaver

Biologiske behov: Ved å identifisere fiskens toleransegrenser for miljøfaktorer som typisk preger forholdene ved eksponerte lokaliteter kan en definere rammene for disse som vil sikre effektiv produksjon samtidig med at et akseptabelt velferdsnivå for fisken opprettholdes. Disse resultatene vil benyttes til å utvikle nye teknikker som reduserer innvirkningen fra miljøforhold som er seg utenfor fiskens toleransegrenser.

Vurdering av velferd: Vitenskapelig baserte metoder for å vurdere fiskens velferd på eksponerte lokaliteter må utvikles for å sikre at tekniske løsninger som utvikles ved dette senteret overholder norsk lov om dyrevelferd. Lignende arbeid som utføres for konvensjonelle oppdrettsanlegg representerer et grunnlag, og kan endres i henhold til de ytterligere utfordringene som kan forekomme ved eksponerte anlegg.

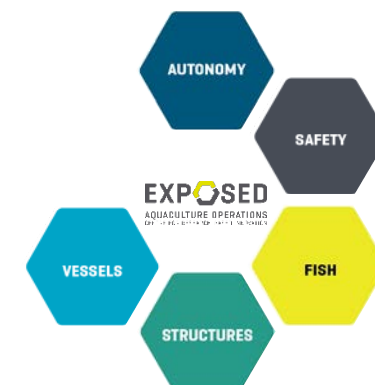
Adferdsrespons: Det er viktig å identifisere hvordan fisken vil respondere mot de vedvarende strøm- og havforholdene som kan oppstå ved eksponerte anlegg.

Slike forhold vil føre til endringer i produksjonsmiljøet (f.eks. økt deformering av merdene og endret fordeling av fôr i merdvolumet) og introdusere sekundæreffekter hvis innvirkning på fiskens atferd må studeres. Resultatene vil danne grunnlag for utviklingen av håndteringsstrategier, teknologisk utstyr og produksjonsmetoder som er bedre egnet for anlegg på eksponerte lokaliteter.

Industriell relevans

Forskningen vil etablere noen av hovedpremissene for den teknologiske forskningen som gjennomføres på de andre forskningsområdene ved senteret, da systemene må ta fiskens behov i betraktning.

Forskningsleder: [Ole Folkedal](#) (HI)



Publikasjoner og rapporter. Side 1

Remen, M., Solstorm, F., Bui, S., Klebert, P., Vågseth, T., Solstorm, D., Hvas, M., Oppedal, F., 2016. *Critical swimming speed in groups of Atlantic salmon *Salmo salar**. Aquaculture Environment Interactions 8, 659-664

Hvas, M., Folkedal, O., Solstorm, D., Vågseth, T., Fosse, J.O., Gansel, L.C., Oppedal, F., 2017. *Assessing swimming capacity and schooling behaviour in farmed Atlantic salmon *Salmo salar* with experimental push-cages*. Aquaculture. 473, 423-429.

Hvas, M., Folkedal, O., Imsland, A., Oppedal, F. 2017. *The effect of thermal acclimation on aerobic scope and critical swimming speed in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.)*. J. Exp. Biol. 220, 2757-2764

Hvas, M., Oppedal, O. 2017. *Sustained swimming capacity of Atlantic salmon*. Aquacult. Env. Interact. 9, 361-369.

Hvas M, Karlsbakk E, Mæhle S, Wright, D., Oppedal, F. 2017. *The gill parasite *Paramoeba perurans* compromises aerobic scope, swimming capacity and ion balance in Atlantic salmon*. Conservation Physiology 5. 10.1093/conphys/cox066

Hvas, M., Folkedal, O., Imsland, A., Oppedal, F. 2018. *Metabolic rates, swimming capabilities, thermal niche and stress response of the lumpfish, *Cyclopterus lumpus**. Biology Open, 7, DOI: 10.1242/bio.036079

Hvas, M., Nilsen, T.O., Oppedal, F. 2018. *Oxygen Uptake and Osmotic Balance of Atlantic Salmon in Relation to Exercise and Salinity Acclimation*. Frontiers in Marine Science, 5, DOI: 10.3389/fmars.2018.00368

Jonsdottir, K. E., Hvas, M., Alfredsen, J. A., Føre, M., Alver, M. O., Bjelland, H., Oppedal, F. 2019. *Fish welfare based classification method of ocean current speeds at aquaculture sites*. Aquacult. Env.

Interact.

Yuen, J.W., Dempster, T., Oppedal, F. & Hvas, M. (2019). *Physiological performance of ballan wrasse (*Labrus bergylta*) at different temperatures and its implication for cleaner fish usage in salmon aquaculture*. Biological Control 135, 117–123.

Oldham, T., Nowak, B. F., Hvas, M., Oppedal, F. 2019. *Metabolic and functional impacts of hypoxia vary with size in Atlantic salmon*. Comp. Biochem. Physiol. Part A. 231.

Hvas, M., Oppedal, F. 2019. *Influence of experimental set-up and methodology for measurements of metabolic rates and critical swimming speed in Atlantic salmon *Salmo salar**. Journal of Fish Biology 95, 893–902.

Hvas, M., Oppedal, F. 2019. *Physiological responses of farmed Atlantic salmon and two cohabitant species of cleaner fish to progressive hypoxia*. Aquaculture. 512 734353.

Hassan, Waseem; Føre, Martin; Urke, Henning Andre; Kristensen, Torstein; Ulvund, John Birger; Alfredsen, Jo Arve. 2019. *System for Real-Time Positioning and Monitoring of Fish in Commercial Marine Farms Based on Acoustic Telemetry and Internet of Fish (IoF)*. The 29th International Ocean and Polar Engineering Conference.

Hassan, Waseem; Føre, Martin; Ulvund, John Birger; Alfredsen, Jo Arve. 2019. *Internet of Fish: Integration of acoustic telemetry with LPWAN for efficient real-time monitoring of fish in marine farms*. Computers and Electronics in Agriculture. vol. 163 104850.

Hassan, Waseem; Føre, Martin; Pedersen, Magnus Oshaug; Alfredsen, Jo Arve. 2019. *A Novel Doppler Based Speed Measurement Technique for Individual Free-Ranging Fish*. The 18th IEEE Sensors.

Hvas, M., Folkedal, O., Oppedal, F. 2019. *Havbasert oppdrett – Hvor mye vannstrøm tåler laks og rensesk?*. Rapport fra Havforskningen.

2019. ISSN: 1893-4536.

Hvas, M., Folkedal, O., Oppedal. 2020. *Heart rates of Atlantic salmon *Salmo salar* during a critical swim speed test and subsequent recovery*. J. Fish Biol.

Hvas, M., Folkedal, O., Oppedal. 2020. *Fish welfare in offshore salmon aquaculture*. Reviews in Aquaculture.

Hvas et al. 2020. *The metabolic rate response to feed withdrawal in Atlantic salmon post-smolts*. Aquaculture, 529.

Hvas, M., Folkedal, O., Oppedal, F. 2020. *Heart rate bio-loggers as welfare indicators in Atlantic salmon (*Salmo salar*) aquaculture*. Aquaculture, 529.

Hvas, M., Stien, L.H., Oppedal, F. 2020. *The metabolic rate response to feed withdrawal in Atlantic salmon post-smolts*. Aquaculture, 529.

Johannesen, A., Patursson, Ø., Kristmundsson, J., Dam, S. P., Klebert, P. 2020. *How caged salmon respond to waves depends on time of day and currents*. PeerJ, 8.

Måløy, H. 2020. *EchoBERT: A Transformer-Based Approach for Behavior Detection in Echograms*. IEEE Access. 0.1109/ACCESS.2020.3042337

Hassan, W., Føre, M., Pedersen, M. O., Alfredsen, J. O. 2020. *A new method for measuring free-ranging fish swimming speed in commercial marine farms using Doppler principle*. IEEE Sensors Journal.



Publikasjoner og rapporter. Side 2.

Hvas, M., Folkedal, O., Oppedal, F. 2021. [What is the limit of sustained swimming in Atlantic salmon post smolts?](#) Aquacult. Env. Interact.

Hvas, M., Stien, L.H., Oppedal, F. 2021. [The effect of fasting period on swimming performance, blood parameters and stress recovery in Atlantic salmon post smolts.](#) Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology, 255.

Risholm, P., Mohammed, A., Kirkhus, T., Clausen, S., Vasilyev, L., Folkedal, O., Johnsen, Ø., Haugholt, K. H., Thieleman, J. 2021. Automatic length estimation of free-swimming fish using an underwater 3D range-gated camera. Aquacult. Eng. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2022.102227>

Føre, M., Svendsen, E., Økland, F., Gräns, A., Alfredsen, J. A., Finstad, B., Hedger, R. D., Uglem, I. 2021. Heart rate and swimming activity as indicators of post-surgical recovery time of Atlantic salmon (*Salmo salar*). Anim Biotelemetry **9**, 3. <https://doi.org/10.1186/s40317-020-00226-8>

Warren-Myers, F., Hvas, M., Vågseth, T., Dempster, T. Oppedal, O. (2021). Sentinels in salmon aquaculture: Heart rates across seasons and during crowding events. Frontiers in Physiology **12**, 755659. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.755659>

McIntosh, P., Barrett, L. T., Warren-Myers, F., Coates, A., Macaulay, G., Szetey, A., Robinson, N, White, C., Samsing, F., Oppedal, F., Folkedal, O., Klebert, P., Dempster, T. 2022. [Supersizing salmon farms in the coastal zone: A global analysis of changes in farm technology and location from](#)

[2005 to 2020.](#) Aquaculture. 553.

Hvas, M., Nilsson, J., Vågseth, T., Nola, V., Fjellidal, P.G., Hansen, T.J., Oppedal, F., Stien, L.H., Folkedal, O. 2022. [Full compensatory growth before harvest and no impact on fish welfare in Atlantic salmon after an 8-week fasting period.](#) Aquaculture, 546.

Johannesen Á, Patursson Ø, Kristmundsson J, Dam SP, Mulelid M, Klebert P (2022) [Waves and currents decrease the available space in a salmon cage.](#) PLoS ONE **17**(2):e0263850.

Hvas, M. 2022. Influence of photoperiod and protocol length on metabolic rate traits in ballan wrasse *Labrus bergylta*. Journal of Fish Biology, 1-10. <https://doi.org/10.1111/jfb.14981>

Hvas, M., Bui, S. 2022. Energetic costs of ectoparasite infection in Atlantic salmon. Journal of Experimental Biology **225**(1), jeb243300. <https://doi.org/10.1242/jeb.243300>

Hassan, W., Føre, M., Urke, H. A., Ulvund, J. B., Bendiksen, E., Alfredsen, J. A. 2022. New concept for measuring swimming speed of free-ranging fish using acoustic telemetry and Doppler analysis. Biosystems Engineering. <https://pubag.nal.usda.gov/catalog/7785894>

Hvas, M. 2022. Swimming energetics of Atlantic salmon in relation to extended fasting at different temperatures. Conservation Physiology. [10.1093/conphys/coac037](https://doi.org/10.1093/conphys/coac037)

Kalanathan, T., Folkedal, O., Gomes, A. S., Lai, F., Handeland, S., Tolås, I., Gelebart, V., Rønnestad, I. 2023. Impact of long-term fasting on the stomach-hypothalamus appetite regulating genes in Atlantic salmon postsmolts. Aquaculture

<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738917>



Oversikt

Populærvitenskapelige publikasjoner og nyheter

Hvas, M., Folkedal, O., Oppedal, F. 2017. *Hvor mye vannstrøm tåler laks på eksponerte lokaliteter?* Norsk Fiskeoppdrett nr. 11, 2017.

Aadland, C. 2018. *Rognkjeksen tåler ikke mer enn 16 grader.* www.fiskeribladet.no

Redaksjonen. 2018. *Lusespiseren sliter i sterk strøm og høy temperatur.* www.kyst.no

Solsletten, V. 2018. *Her tester de hvor mye laksen tåler.* www.fiskeribladet.no

Solsletten, V. 2018. *Akustiske merker forteller hvordan laksen har det i merden.* www.fiskeribladet.no

Behary, S. 2018. How Will Aquaculture's Shift Offshore Affect the Feed Industry? <https://marketing.feedinfo.com/insight-how-will-aquacultures-shift-offshore-affect-the-feed-industry/>

Jensen, P. M. 2019. *Krapp sjø påvirker laksen mest.* www.kyst.no

Fagerbakke, K. 2019. Sterk vannstrøm kan gi utfordringer for laks og rensefisk. <https://www.hi.no/hi/nyheter/2019/november/sterk-vannstrom-kan-gi-utfordringer-for-laks-og-rensefisk>

Jakobsen, A. *Forskere har gitt laks egne «puls-klokker».* www.hi.no

Jakobsen, A. Oppdrettslaks klarer seg fint uten fôr i opptil fire uker. <https://www.hi.no/hi/nyheter/2020/november/oppdrettslaks-klar-er-seg-fint-uten-for-i-opptil-fire-uker>

Soltveit, T. 2020. *Uansett bølger var fisken høyere oppe i vannsøylen når strømmen var sterk.* www.kyst.no

Fagerbakke, C. 2020. Vår beste forskning i 2020: Laksen har høy

svømmekapasitet – også til havs. <https://www.hi.no/hi/nyheter/2020/oktober/laksen-har-hoy-svømmekapasitet-ogsa-til-havs>

Nagelsen, V. 2021. Laksen er en god marathonsvømmer. <https://www.hi.no/hi/nyheter/2021/oktober/laksen-er-en-god-marathonsvømmer>

Muri, C. 2021. Hvor lenge kan oppdrettslaks gå uten fôr? <https://www.hi.no/hi/nyheter/2021/august/hvor-lenge-kan-oppdrettslaks-ga-uten-for>

Howell, M. 2021. Cleanerfish may not be suitable for de-lousing offshore salmon farms. <https://thefishsite.com/articles/cleanerfish-may-not-be-suitable-for-de-lousing-offshore-salmon-farms>

Masteroppgaver

Riseth, E.N. 2018. *Diploid vs triploid Atlantic salmon (Salmo salar) – Do diploid Atlantic salmon (Salmo salar) have higher swimming capacity than triploid?* Uni. Agder, Veileder Gonzalez, EB, Stien, LH og Hvas, M.

Yuen, J. W. 2018. *Effect of temperature on metabolic scope and swimming capacity in the ballan wrasse (Labrus bergylta).* Uni. Melbourne, to be delivered Q4 2018. Veiledet av Hvas, M.



Dyrevelferd i eksponert akvakultur

VEILEDERE

Forsker Ole Folkedal (Havforskningsinstituttet)
Forsker Frode Oppedal (Havforskningsinstituttet)

PERIODE

PhD: Q2 2016 – Q2 2019
Postdoc: 2019 – 2023

Vi undersøker hvilke miljøtoleranser laks og rensefisk har. Spesifikt undersøker vi svømmeevne under forskjellige betingelser, og hvordan sterk vannstrøm påvirker adferden og fysiologien. Til dette formål har vi utviklet og etablert ny metodikk og nye protokoller (skyvemerd og svømmetunneler).



Bilder fra Malthe Hvas sitt kurs i Japan, juli 2018 om smoltifiseringsfysiologi i masulaks (til høyre).



Artikler: Se fullstendig oversikt over! Noen utvalgte:

Remen, M., Solstorm, F., Bui, S., Klebert, P., Vågseth, T., Solstorm, D., Hvas, M., Oppedal, F., 2016. *Critical swimming speed in groups of Atlantic salmon Salmo salar*. Aquaculture Environment Interactions 8, 659-664

Hvas, M., Folkedal, O., Solstorm, D., Vågseth, T., Fosse, J.O., Gansel, L.C., Oppedal, F., 2017. *Assessing swimming capacity and schooling behaviour in farmed Atlantic salmon Salmo salar with experimental push-cages*. Aquaculture. 473, 423-429.

Hvas, M., Folkedal, O., Imsland, A., Oppedal, F. 2017. *The effect of thermal acclimation on aerobic scope and critical swimming speed in Atlantic salmon (Salmo salar L.)*. J. Exp. Biol. 220, 2757-2764

Hvas, M., Oppedal, O. 2017. *Sustained swimming capacity of Atlantic salmon*. Aquacult. Env. Interact. 9, 361-369.

Hvas M, Karlsbakk E, Mæhle S, Wright, D., Oppedal, F. 2017. *The gill parasite Paramoeba perurans compromises aerobic scope, swimming capacity and ion balance in Atlantic salmon*. Conservation Physiology 5. 10.1093/conphys/cox066

Hvas, M., Folkedal, O., Imsland, A., Oppedal, F. 2018. *Metabolic rates, swimming capabilities, thermal niche and stress response of the lumpfish, Cyclopterus lumpus*. Biology Open, 7, DOI: 10.1242/bio.036079

Hvas, M., Nilsen, T.O., Oppedal, F. 2018. *Oxygen Uptake and Osmotic Balance of Atlantic Salmon in Relation to Exercise and Salinity Acclimation*. Frontiers in Marine Science, 5, DOI: 10.3389/fmars.2018.00368

Yuen, J.W., Dempster, T., Oppedal, F. & Hvas, M. (2019). *Physiological performance of ballan wrasse (Labrus bergylta) at different temperatures and its implication for cleaner fish usage in salmon aquaculture*. Biological Control 135, 117–123.

Oldham, T., Nowak, B. F., Hvas, M., Oppedal, F. 2019. *Metabolic and functional impacts of hypoxia vary with size in Atlantic salmon*. Comp. Biochem. Physiol. Part A. 231. , 30–38.

Hvas, M., Oppedal, F. 2019. *Influence of experimental set-up and methodology for measurements of metabolic rates and critical swimming speed in Atlantic salmon Salmo salar*. Journal of Fish Biology 95, 893–902.

Hvas, M., Oppedal, F. 2019. *Physiological responses of farmed Atlantic salmon and two cohabitant species of cleaner fish to progressive hypoxia*. Aquaculture. 512 734353.

Hvas M, (2019) *Physiology and welfare of Atlantic salmon and cleaner fish in exposed aquaculture*. Doctoral thesis at University of Bergen. ISBN 9788230845271

Akustisk telemetri på fisk for sanntidsovervåkning i akvakultur

VEILEDERE

Førsteamanuensis Jo Arve Alfredsen (NTNU)
Førsteamanuensis Martin Føre (NTNU)

PERIODE

Q4 2016 – Q4 2020
Disputert 2021

Sanntidsovervåkning av fiskeatferd i akvakultur med akustisk telemetri.

Jeg jobbet med to hovedidéer/prosjekter i min PhD.

1. Svømmehastighetsmåling for fisk basert på dopplerskift i akustisk signal. En algoritme for måling av svømmehastighet er utviklet og eksperimentelt validert i et havbruksanlegg, med en fjernstyrt katamaran til å emulere fiskens bevegelse. Resultatene fra eksperimentet bekrefter at måleprinsippet fungerer og det vil bli fulgt opp i nye eksperimenter med akustisk merket fisk. Videre er det planlagt ytterligere eksperimenter med merket fisk.

2. Internet of Fish (IoF) er et konsept basert på Internet of Things der low-power wide-area networks (LPWANs) brukes til å gi sanntidsstøtte til systemer for innsamling av fisketelemetridata. IoF-systemet gir også mulighet til å lokalisere fisk i sanntid. Systemet har blitt validert/brukt i industri-skala havbruksanlegg.



Artikler:

Hassan, Waseem; Føre, Martin; Urke, Henning Andre; Kristensen, Torstein; Ulvund, John Birger; Alfredsen, Jo Arve. 2019. *System for Real-Time Positioning and Monitoring of Fish in Commercial Marine Farms Based on Acoustic Telemetry and Internet of Fish (IoF)*. The 29th International Ocean and Polar Engineering Conference.

Hassan, Waseem; Føre, Martin; Ulvund, John Birger; Alfredsen, Jo Arve. 2019. *Internet of Fish: Integration of acoustic telemetry with LPWAN for efficient real-time monitoring of fish in marine farms*. Computers and Electronics in Agriculture. vol. 163 104850.

Hassan, Waseem; Føre, Martin; Pedersen, Magnus Oshaug; Alfredsen, Jo Arve. 2019. *A Novel Doppler Based Speed Measurement Technique for Individual Free-Ranging Fish*. The 18th IEEE Sensors.

Hassan, W., Føre, M., Pedersen, M. O., Alfredsen, J. O. 2020. *A new method for measuring free-ranging fish swimming speed in commercial marine farms using Doppler principle*. IEEE Sensors Journal.

Hassan, W. 2021. *Fish on net: Acoustic Doppler telemetry and remote monitoring of individual fish in aquaculture*. Doctoral theses at NTNU; 2021:259

Hassan, W., Føre, M., Urke, H. A., Ulvund, J. B., Bendiksen, E., Alfredsen, J. A. 2022. New concept for measuring swimming speed of free-ranging fish using acoustic telemetry and Doppler analysis. Biosystems Engineering. <https://pubag.nal.usda.gov/catalog/7785894>



Strømningsdynamikk og turbulens i stor-skala oppdrettsmerder

VEILEDERE

Førsteamanuensis Jo Arve Alfredsen (NTNU)
 Førsteamanuensis Morten Alver (NTNU)
 Seniorforsker Zsolt Volent (SINTEF Ocean)

PERIODE

Q3 2016 – Q3 2020
 Disputert 2021

Målet med prosjektet er å etablere ny teoretisk og empirisk forskning relatert til dynamikken til vannstrømmen og turbulens på innsiden av stor-skala fiskemerder.

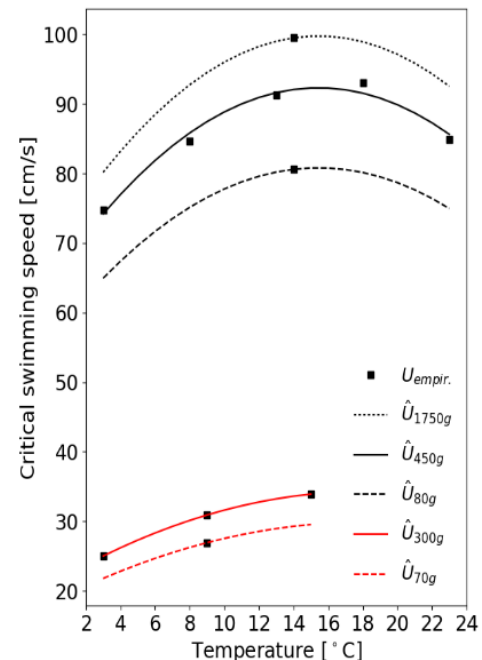
For å kunne undersøke strømmen på innsiden av fiskemerder har det også vært nødvendig å undersøke havstrømmene rundt merder. I den sammenheng var det av interesse å undersøke hvordan man kan evaluere havstrømmene med tanke på fiskevelferd.

Data fra de tre Exposed-bøylene, og to bøyer satt ut i sammenheng med RACE-prosjektet, ble benyttet i artikkelen publisert 2019. I artikkelen blir det foreslått et klassifiserings-skjema for styrken på havstrømmene basert på den kritisk svømmehastighet til liten post-smolt og rognkjeks.

Resultatet fra denne undersøkelsen indikerer at selv om laksen er egnet til de

fleste lokalitetene, så sliter rognkjeks siden havstrømmene ofte overskrider deres kritiske svømmehastighet.

For å etablere ny kunnskap om havstrømmene inne i stor-skala fiskermerder er det gjennomført målekampanjer ved tre lokaliteter i Lofoten, og en i Trøndelag ved Hosnøyen. Dataen samlet fra disse lokalitetene analyseres nå, og sammenlignes med CFD analyser for å kunne belyse hvordan havstrømmen beveger seg gjennom merden. Dette arbeidet er fortsatt pågående.



Temperaturavhengig funksjon av kritisk svømmehastighet fra (Jónsdóttir, et al., 2019), basert på kritisk svømmehastighet til laks (sort) og rognkjeks (rød) funnet i arbeid utført av Hvas et al. (2017, 2018) og Remen et al. (2016).

Jónsdóttir, K. E., Hvas, M., Alfredsen, J. A., Føre, M., Alver, M. O., Bjelland, H. V. & Oppedal, F. (2019). *Fish welfare based classification method of ocean current speeds at aquaculture sites*. *Aquaculture Environment Interactions* 11, 249-261.

Current range [cm s ⁻¹]	Current class	Fish swimming behaviour
0 – 10	Very weak	Swimming freely
10 – 20	Weak	
20 – 40	Moderate	Circular pattern is broken
40 – 50	Substantial	Begin to stand on current
50 – 60	Strong	All fish standing on current
> 60	Very strong	Exceeds U_{crit}

Foreslått klassifisering av vannhastighet basert på observerte fiske adferd og kritisk svømmehastighet til liten post-smolt (Jónsdóttir, et al., 2019).



Laks og surfing – adferd og velferd hos oppdrettslaks på eksponerte lokaliteter

VEILEDERE

Seniorforsker [Pascal Klebert](#) (SINTEF Ocean)
Konsulent [Øystein Patursson](#) (på vegne av Fiskaaling)

PERIODE

Q3 2018 – Q3 2020

Hovedformålet med dette prosjektet er å forstå de tilpasningsmekanismer laks på eksponerte lokaliteter bruker og hvor mye eksponering for bølger og strøm de tåler uten at det har en negativ innvirkning på deres velferd.

Det er i dag lite erfaring i praksis med oppdrett på eksponerte lokaliteter. Lakseoppdrettsanlegg på Færøyene kan derimot regnes som relativt eksponerte. Undersøkelser av laks i disse merdene kan derfor gi indikasjon på hvordan laks påvirkes av eksponerte forhold.

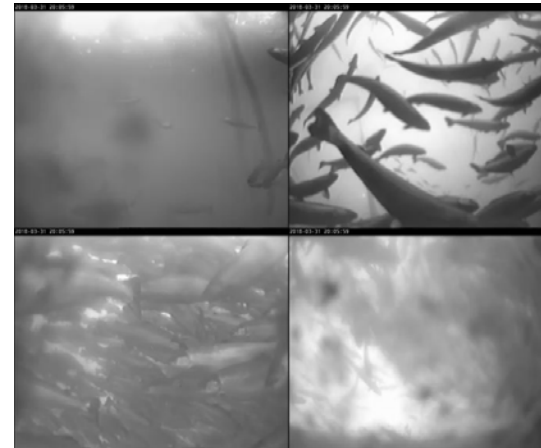
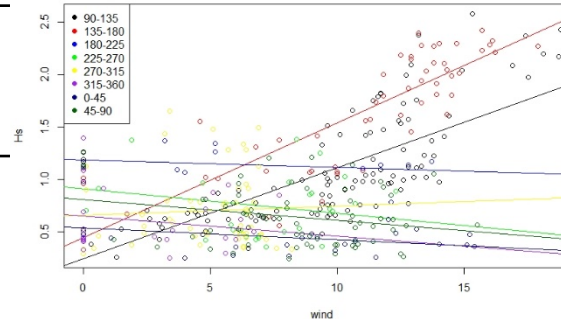
Dette prosjekter baseres på feltarbeid på Færøyene hvor laks observeres ved bruk av:

- Ekkolodd
- Videokamera
- PIT/RFID-tagger
- Telemetri-tagger

I tillegg til adferd, vil laksevelferden bli klassifisert med et modifisert SWIM-scoringssystem. Dødelighet, luseinfeksjonsstatus og fôrforbruk vil også bli målt.

Adferd og velferd relateres til strømprofiler, punktstrømmålere og værdata.

Ved å kombinere informasjon om strøm- og bølgeforhold med adferd og velferd, vil det være mulig å finne ut når forholdene er så dårlige at laksens tilpasningsmekanismer ikke lenger er tilstrekkelige for å forhindre negativ innvirkning på velferd.



Resultater så langt:

- I forbindelse med prosjektet «Future Welfare» ble data samlet inn på en lokasjon før postdoc-prosjektets oppstart. Dette var korttidsmålinger, så de fokuserte hovedsakelig på adferd til laks i forhold til bølger.
- Resultatene indikerer at laks har en tendens til å forflytte seg lenger ned i merden med økende signifikant bølgehøyde.
- Resultater fra feltarbeid 2019/2020 viste liknende tendens og at laksen forflytter seg horisontalt når det er høye bølger.
- Johannesen, A., Patursson, Ø., Kristmundsson, J., Dam, S. P., Klebert, P. 2020. *How caged salmon respond to waves depends on time of day and currents*. PeerJ, 8., e9313.
- Johannesen Á, Patursson Ø, Kristmundsson J, Dam SP, Mulelid M, Klebert P (2022) *Waves and currents decrease the available space in a salmon cage*. PLOS ONE 17(2):e0263850.

PROSJEKTLEDER

Ole Folkedal (Havforskningsinstituttet)

PARTNERE INVOLVERT

HI, NTNU, SINTEF Ocean, SalMar, Cermaq, Marine Harvest, Anteo, Aqualine, AQS, Lerow, DNV

PERIODE

Q2 2015 – Q4 2018

TYPE FORSKNING

Grunnleggende

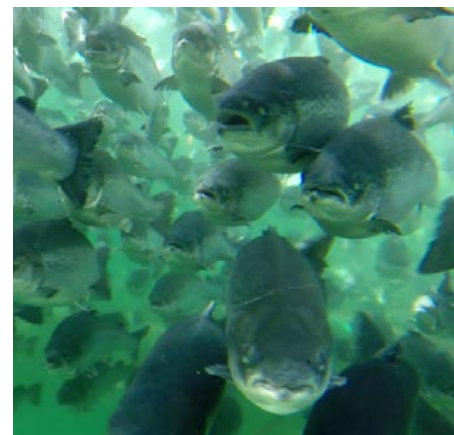
Oppdrettsmiljøet må være tilpasset laksens biologiske behov, som tilsier at den ikke eksponeres for forhold den ikke kan mestre. Eksponert oppdrett krever særlig kunnskap om hvor godt og hvordan fisken takler sterk strømstyrke og bølger.

P16 sitt formål, og tidligere P5, er å være premissleverandør for å sikre at eksponert oppdrett og operasjoner er tilpasset fiskens mestringsevne; at lokalitetsvalg, produksjonsstrategi, konstruksjons- og operasjonstilpasninger baserer seg på relevant kunnskap om fiske-atferd og velferd, og miljøet fisken opplever.

Eksponert oppdrett innebærer kraftigere vannstrømstyrke og bølger. Disse faktorene medfører større energiforbruk for fisken gitt atferdsmessige tilpasninger for å forholde seg til både bevegelse av vann og merdkonstruksjonen, samt optimalisere sosiale strukturer. Tilleggsbelastning i form av sykdom og stress ved f.eks. avlusning og levering kan kreve nye tekniske og operasjonelle løsninger, og værforhold kan gi velferdsmessige

utfordringer inkl. opphold i føring og tilsyn.

Kunnskap om det faktiske oppdrettsmiljøet fisken opplever (inkl. strøm- og bølgekrefter) og hvordan og hvor mye basale faktorer (f.eks. fiskestørrelse, temperatur og sykdom) påvirker svømmekapasitet, metabolisme, og atferd er vesentlig for se muligheter og begrensninger, og tolke observasjoner av fiskens atferd og velferd i eksponerte anlegg. Feltobservasjoner er spesielt utfordrende i eksponert oppdrett, og nye verktøy kreves for å måle relevante atferds-parametre. Individuelle fiskemerker, og bruk av miljø, atferd og fysiologiske data til maskinlæring (modeller) er i denne sammenheng viktige verktøy.



Resultater:

- Hvor mye vannstrøm tåler laksen?
- Toleransegrenser, metodeutvikling og modellering
- Lokalitetsvurdering gitt fiskevelferd

Innovasjonspotensiale:

- Synliggjøre behov for innovasjon mot utforming av konstruksjoner og operasjonelle tilpasninger gitt fiskens toleransegrenser
- Danne fiskevelferdsmessig grunnlag for lokalitetsvalg gitt teknologisk utforming.
- Utvikle og verifisere teknologiske løsninger for å måle atferd og fysiologi hos fisk (respirometri, merker mm.).

Assosierte prosjekter:

- Future Welfare (NFR, 2017-2021)
- ECHOFEEDING (NFR, 2017-2021)
- SalmonInsight (NFR, 2018-2022)

Hvor mye vannstrøm tåler laksen?

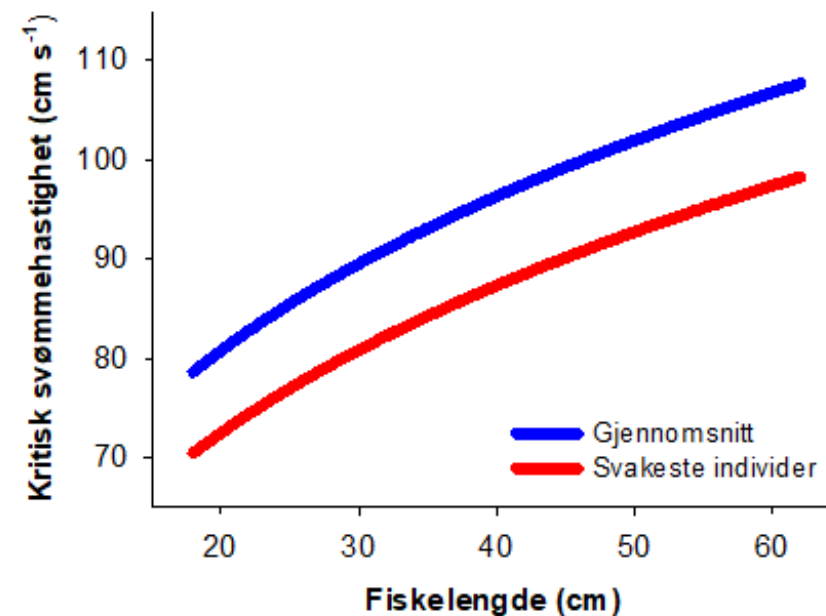
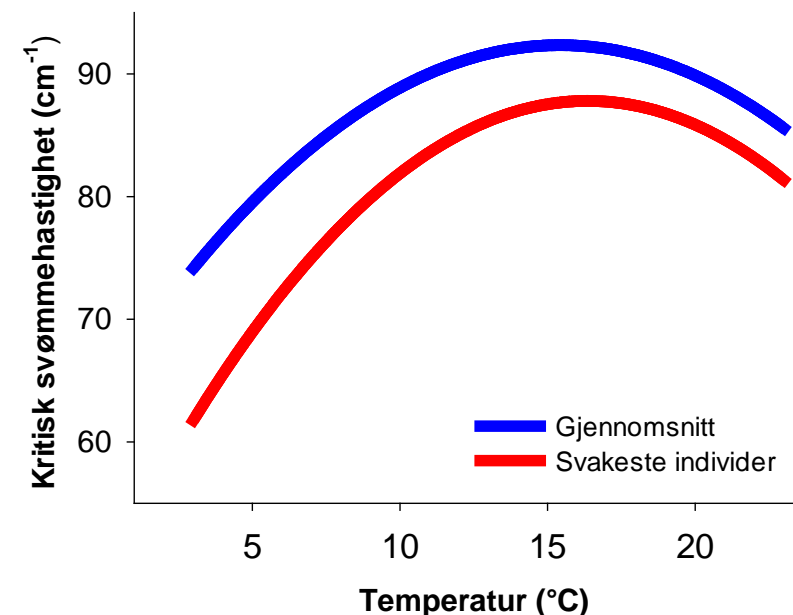
Laks er en fleksibel og atletisk fisk. Toleransen for vannstrømstyrke påvirkes i størst grad av fiskestørrelse og temperatur. Dette tilsier at grenseverdiene er ulike for når i produksjonen en befinner seg og for ulike årstider.

For å finne ut hvor hurtig laksen klarer å svømme, økes vannstrømmen i en svømmetunell hvert 20–30 minutt med omkring en halv kroppslengde per sekund, inntil laksen ikke lenger kan svømme mot strømmen. Når dette punktet er nådd, har man målt den kritiske svømmehastigheten, som er den sentrale velferdsindikatoren når det gjelder eksponert oppdrett. Den kritiske svømmehastigheten er således et mål for hvor sterk vannstrøm laksen tåler i kort tid (minutter), og i teorien bør den derfor aldri oppleve vannstrøm i merden som overstiger dette nivået.

I forhold til størrelse er det logisk at en stor fisk kan svømme hurtigere enn en liten fisk, og dermed også tolerere sterkere vannstrøm. Eksempelvis har en laks på 20 cm og 80 gram i gjennomsnitt en kritisk svømmehastighet på 0,8 meter per sekund, mens laks på 43 cm og 850 gram klarer 1 meter per sekund. I tillegg til dette er det også en del variasjon i

svømmeevnen mellom forskjellige individer på samme størrelse, hvor noen er gode svømmere mens andre er dårlige. Når akseptable grenser for vannstrøm i merder må defineres, trenger vi derfor å ta hensyn til denne variasjonen i svømmekapasitet.

Temperaturen i vannet er en annen helt avgjørende faktor for laksens velferd. Grunnen til dette er at fisk er vekselvarme dyr, der kroppstemperaturen følger omgivelsene. Alle de viktige biologiske prosesser som stoffskiftet, vekst, appetitt og ikke minst svømmekapasitet blir derfor påvirket av vanntemperaturen. I forhold til svømmeevnen er den kritiske svømmehastigheten høyest mellom 13 og 18 °C, mens den er kraftig redusert ved både 3 og 23 °C. I praksis er det mest relevant å forholde seg til de kalde temperaturer, der laksen om vinteren vil være mer sårbar overfor sterk vannstrøm sammenlignet med om sommeren.



Toleransegrenser, metodeutvikling og modellering

P16 og P5 har etablert kunnskap om både laks og rensefisk sine toleransegrenser for vannstrømstyrke, og undersøker gruppe- og individuell atferd i forsøks- og kommersielle merder hvor også bølger er en viktig faktor. Teknologisk rettet aktivitet omfatter utvikling av fisketagger og kommunikasjonsystemer som tillater relevante målinger i eksponert oppdrett, og innsamling og bruk av miljø og biologiske data til å forstå av hva fisken opplever og predikere responser gjennom modellering.

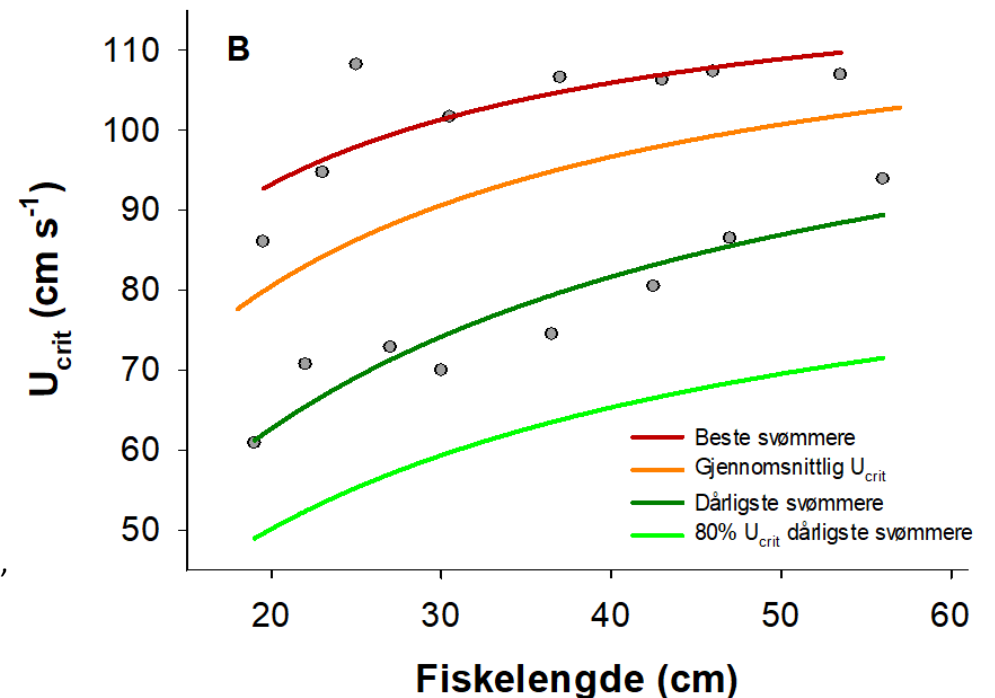
Laks og rensefisk sine toleransegrenser og mestringsstrategier for eksponerte oppdrettsforhold har i stor grad vært ubeskrevet. Gjennom både tradisjonelle og innovative eksperimentelle forsøksoppsett med fisk, har P16 undersøkt og beskrevet metabolisme og svømmekapasitet hos laks og rensefisk. Mens laksen er atletisk, responderer momentant på akutte stressorer og tåler vedvarende moderate til høye svømmehastigheter, befinner rensefisk-artene rognkjeks og berggylt på andre siden av skalaen. Således forventes ikke rensefisk å oppleve god velferd i eksponerte merder med mindre det tilpasses omhyggelig med skjul.

Laksens gruppeatferd forandres med vannstrømstyrken, som demonstrert både i kommersielt anlegg og i skyvemerdforsøk. Pågående forsøk i kommersielle merder på Færøyene vil vise relevansen av ulike atferdsindikatorer på individ og gruppenivå, inkludert

mot produksjonsdata, hvor også effekten av bølger på fiskens atferd undersøkes.

Den teknologiske forskningen i P16 og P5 har ført til en ny kommunikasjonsløsning for fjernovervåking av individfisk i merd. Teknologien er kalt Internet of Fish (IoF) og er en signifikant forbedring angående signalrekkevidde. Svømmehastighet hos laks er en viktig indikator for å forstå atferden, spesielt relativt til vannstrømstyrke. Individuell svømmehastighet er nylig demonstrert ved doppler-shift, og en tag vil snart testes i fisk under realistiske oppdrettsforhold. Dette vil bidra til detaljert overvåking og forståelse av atferdsendringer gitt både strøm og bølgeforhold.

Bruk av maskinlæring for miljø- og adferdsdata, inkl. fra ekkolodd utvikles som verktøy mot å forstå og predikere atferds-dynamikken inn mot eksponert oppdrett.



Lokalitetsvurdering gitt fiskevelferd

Miljødata fra 5 eksponerte oppdrettslokalteter ble nylig brukt for å kartlegge vannstrøms-forholdene gitt laks og rognkjeks sine grenseverdier for vannstrømstyrke, som etablert i P16. Studiet foreslår ny metodikk for klassifisering av lokaliteter, og at strømforholdene for dagens eksponerte anlegg er innenfor laksens mestringssevne.

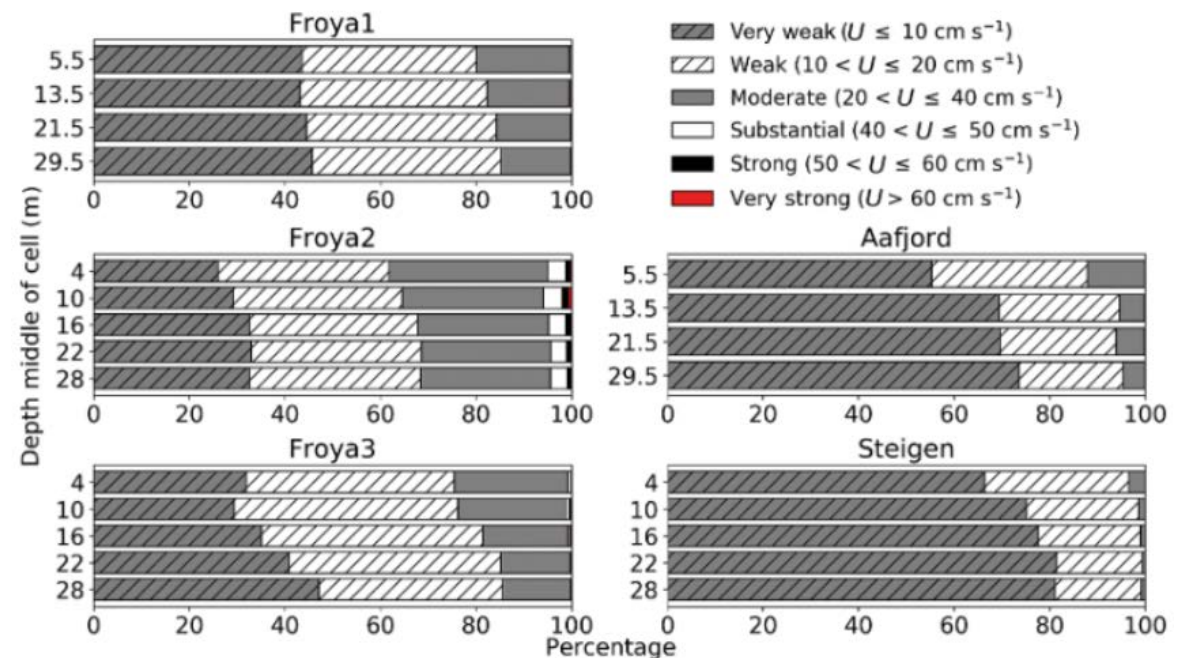
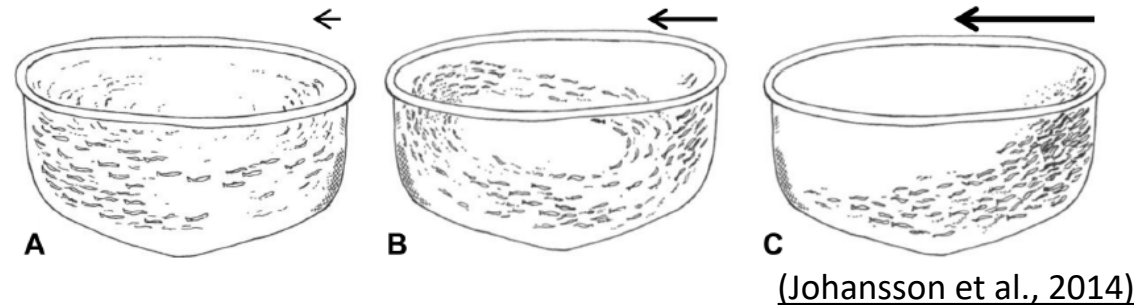
Strømhastighet ble målt for 5 lokaliteter langs norskekysten over minimum 5 måneder som inkluderte vinter. For å evaluere risiko for dårlig fiskevelferd gitt vannstrømstyrke, ble vannstrømmen klassifisert relativt til kjente forandringer i svømmeatferd ved økt strømstyrke, hvor hyppighet og varighet av strømstyrke ble evaluert mot kritisk svømmehastighet gitt fiskestørrelse og temperatur.

Samtlige lokaliteter ble klassifisert til å ha veldig svak til svak strømstyrke det meste av tiden. 'Veldig sterk strøm' forekom over gjentatte korte tidsrom for to av lokalitetene, hvor maks strømstyrke og middelværdi innen en tidevannsdrevet strømtopp var 112.5 og 42.3 cm s⁻¹. Gitt svømmekapasitet til liten post-smolt ved lav temperatur kunne den fått problemer her. Tatt

svømmekapasiteten til rognkjeks i betraktning, representerte strømforholdene for samtlige lokaliteter verdier over svømmekapasiteten.

Dataene viser at NS-klassifiseringen av strømstyrke ikke nødvendigvis speiler de faktiske lokalitets-forholdene som fisken opplever. F.eks. andel tid med lav strømstyrke kan være vidt forskjellig innen samme klasse. Den foreslåtte nye metoden, basert på fiskevelferd, bygger på å sette en øvre grenseverdi som basert på fiskens størrelse og temperatur, hvor varighet og hyppighet av strømtopper analyseres.

Figurer: Øvre figur viser atferdsendring ved økende strømstyrke for laks. Nedre figur viser fordeling av kategorier for vannstrømstyrke ved ulike dyp per lokalitet.



Jónsdóttir, K. E., Hvas, M., Alfredsen, J. A., Føre, M., Alver, M. O., Bjelland, H. V. & Oppedal, F. 2019. Fish welfare based classification method of ocean current speeds at aquaculture sites. Aquaculture Environment Interactions 11, 249-261.



EchoBERT¹ - Fiskevelferd fra ekkogram

Tradisjonell overvåking av fiskevelferd er arbeidskrevende og stressende for fisken. Det involverer manuell overvåking fra video, tagging av fisk eller manuell inspeksjon av enkeltindivider. Ekkodata gir et historisk innblikk i fiskens posisjon gjennom hele vannsøylen uten å påvirke fisken. EchoBERT kombinerer ekkodata med state-of-the-art maskinlæring og kan detektere endringer i fiskeatferd og fiskevelferd.

Tidligere automatiske løsninger for automatisk tolkning av ekkogram håndterer ekkogram som bilder. De mangler derfor tidsaspektet ved dataen og kan ikke forstå den underliggende dynamikken. EchoBERT håndterer derimot ekkogram som historiske data og forstår sammenhenger over tid.

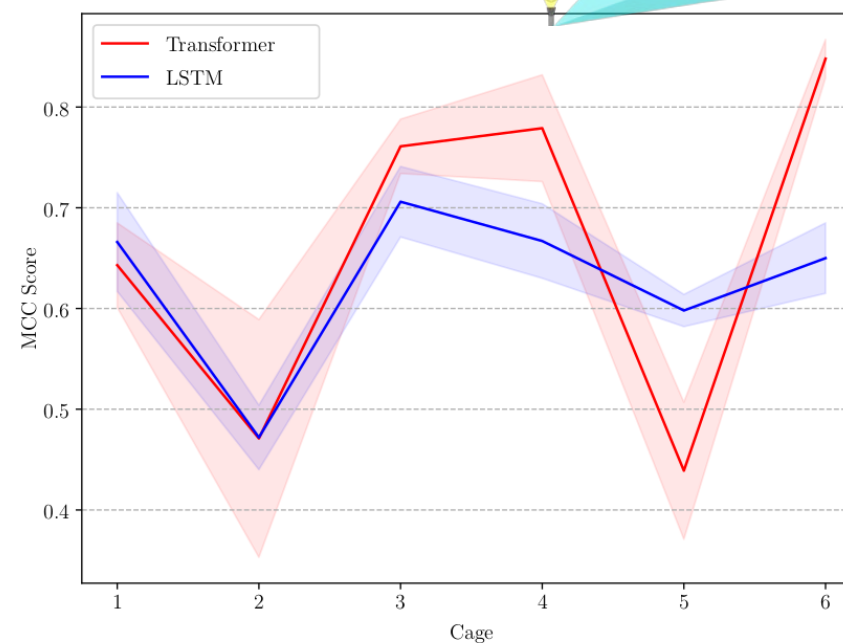
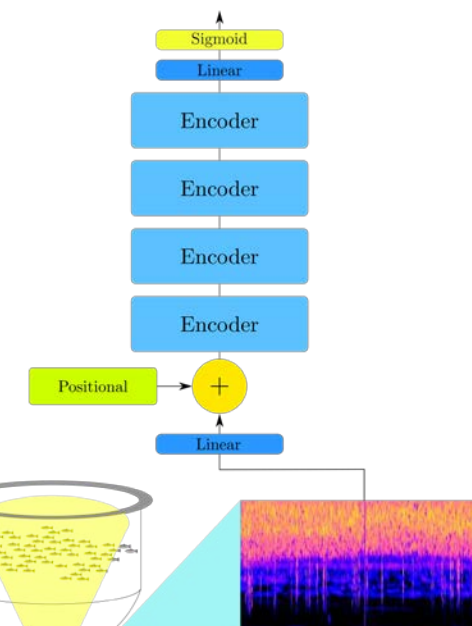
EchoBERT består av transformer encodere - en relativt ny form for nevrale nettverk som baserer seg på "attention", eller oppmerksomhet. Disse nettverkene lærer seg hvor de skal følge med i dataen. De kan derfor vektlegge viktig informasjon dynamisk for hvert datapunkt. De kan også se sammenhenger over lengre tidsrom en tradisjonelle nevrale nettverk.

Vi sammenlignet EchoBERT med tradisjonelle sekvensielle nevrale nettverk (LSTM) på oppgaven å detektere Pancreas Disease (PD) kun ved bruk av ekkogram.

Vi fant at EchoBERT presterte bedre enn LSTMs og kunne detektere PD over en måned før man så det typiske fallet i appetitt hos fisken.

Fremtidig arbeid involverer forsøk med deteksjon av flere atferdsmønstre og miljødata.

1. Måløy, H. 2020. *EchoBERT: A Transformer-Based Approach for Behavior Detection in Echograms*. IEEE Access. 0.1109/ACCESS.2020.3042337

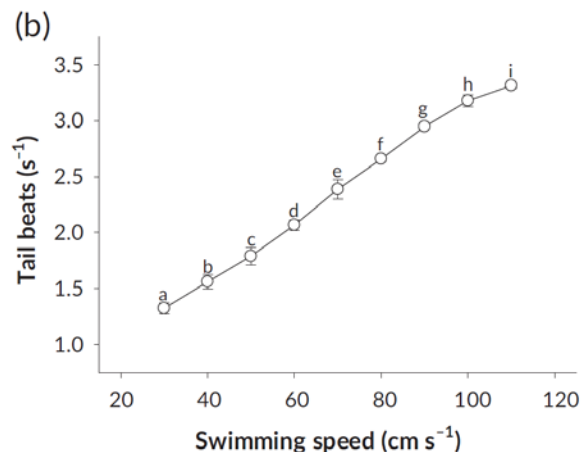
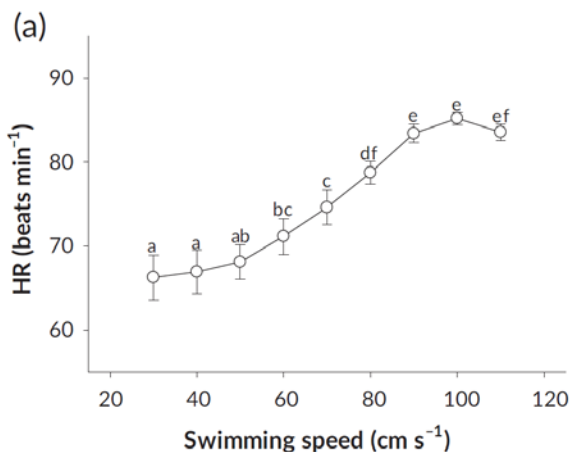
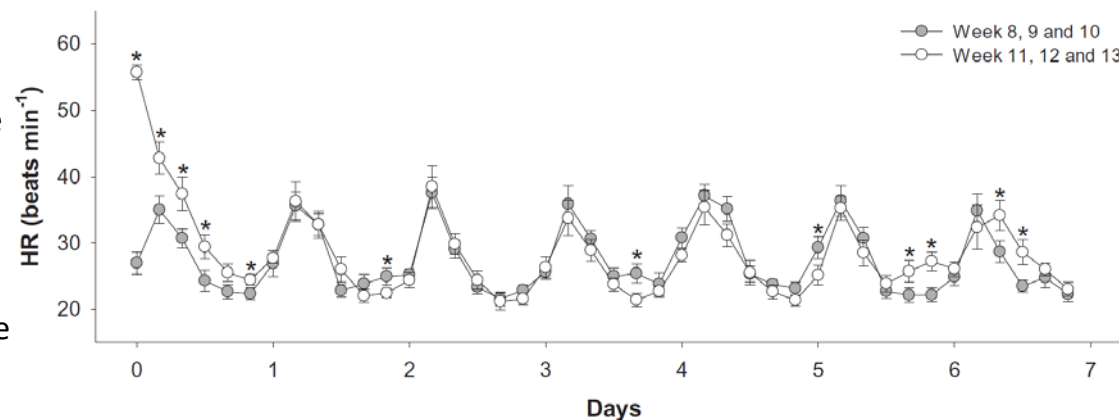
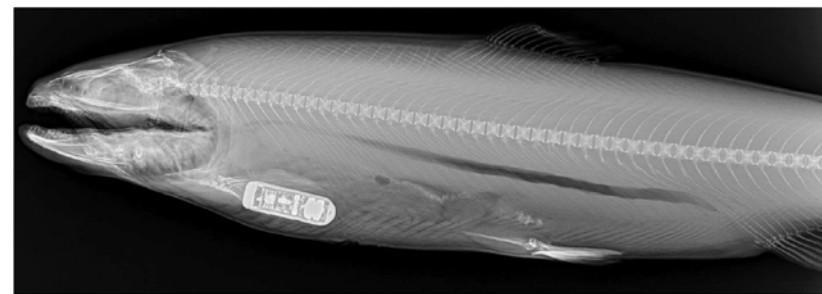


Laksens hjerterate som velferdsindikator

Tagger som effektivt måler og logger hjerterate hos fisk over lengre tidsrom er av interesse for å undersøke fiskens aktivitetsnivå, energiforbruk, og stressende opplevelser.

Hjerterate (HR)-taggen fra Star-Oddi har blitt undersøkt i to studier ved HI på Matre. Fisken ble påvirket av operasjonen, hvor hvilepulsen sank de 2-3 første ukene og etablerte seg på ca. 25 slag per min. Videre hadde fisken noe dårligere vekst enn umerket fisk som målt over 13 uker, som viser at det kreves relativt lang restitusjon. Laksen viste klar døgnvariasjon (lys og mørke) i HR, som økte dagtid og spesielt ved fôring. Både ved akutt stress-test (30

min) og ved tvungen svømming til utmattelse tok det ca. ett døgn før fisken var tilbake på normal HR. I svømmetesten viste tagget laks samme svømmekapasitet som umerket fisk, som taler for at taggen gir representative resultater og er egnet for videre bruk for måling av belastningen laks opplever i eksponerte oppdrettsanlegg.



Artikler:

Hvas, M., Folkedal, O., Oppedal, F. 2020. *Heart rate bio-loggers as welfare indicators in Atlantic salmon (*Salmo salar*) aquaculture*. Aquaculture, 529.

Hvas, M., Folkedal, O., Oppedal. 2020. *Heart rates of Atlantic salmon *Salmo salar* during a critical swim speed test and subsequent recovery*. J. Fish Biol.

Laksen faster uten problemer

En risiko med havbasert oppdrett er utsatt for leveranse eller tekniske problemer for utføring som kan medføre fasteperioder for laksen.

Tre eksperimenter er utført av HI for å undersøke hvordan faste påvirker laksens metabolisme, stressrespons, svømmekapasitet, og hvor vidt laksen kompenserer for tapt vekst.

Laksens hvilemetabolisme var redusert med 22% etter 3-4 ukers fasting, hvor laksen viste en mild nedgang i respons til en akutt stressor etter 4 uker.

Svømmekapasiteten var ikke redusert selv etter 4 ukers fasting, og

faste-effekten på restitusjon etter å ha svømt til utmattelse var liten.

Etter fasting i 8 uker gjenvant laksen appetitten over 2 uker og kompenserte stort de neste to månedene hvor fisken var nær i størrelse til fisk som ikke hadde fastet. Ved slakt 6 mnd. senere var størrelsen for fastet fisk lik til kontrollen.

Samlet sett viser forsøkene, som innebar ekstremt lang fasting, ingen videre negative effekter på laksens velferd. Dette speiler laksens biologi og naturlige liv hvor fasteperioder forekommer.

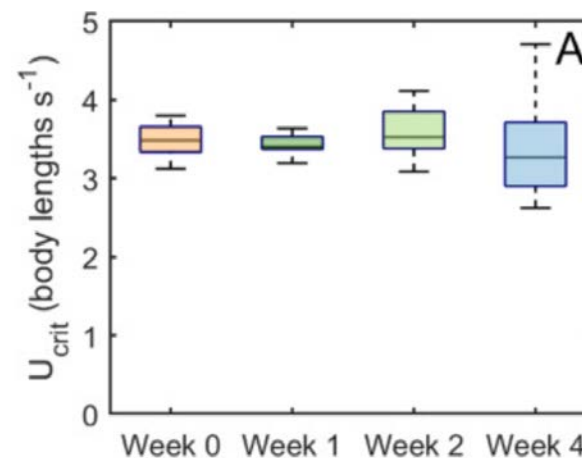
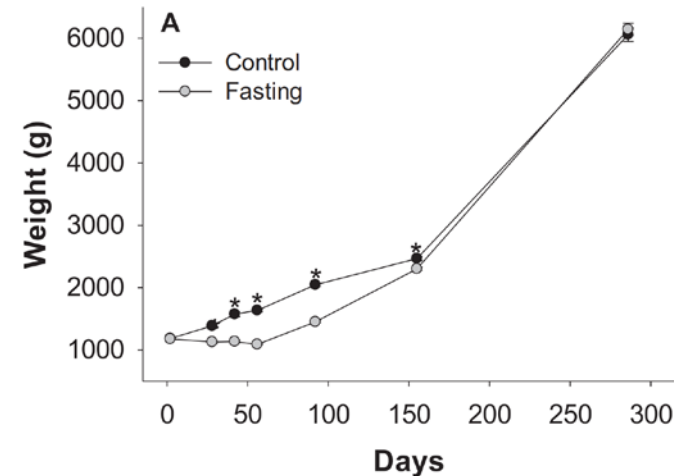
Artikler:

Hvas, M., Stien, L.H., Oppedal, F. 2020. *The metabolic rate response to feed withdrawal in Atlantic salmon post-smolts*. Aquaculture, 529.

Hvas, M., Stien, L.H., Oppedal, F. 2021. *The effect of fasting period on swimming performance, blood parameters and stress recovery in Atlantic salmon post smolts*. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology, 255.

Hvas, M., Nilsson, J., Vågseth, T., Nola, V., Fjellidal, P.G., Hansen, T.J., Oppedal, F., Stien, L.H., Folkedal, O. 2022. *Full compensatory growth before harvest and no impact on fish welfare in Atlantic salmon after an 8-week fasting period*. Aquaculture, 546.

Hvas, M. 2022. Swimming energetics of Atlantic salmon in relation to extended fasting at different temperatures. Conservation Physiology. [10.1093/conphys/coac037](https://doi.org/10.1093/conphys/coac037)



Hjerterate-tagger er nyttige

Det har vært kjørt en rekke forsøk på tagger som måler hjerte-rate, som er funnet å være et nyttig mål på fiskens kroppslige belastning og evne til restitusjon.

HI har kjørt to forsøk i lab, hvor det første viser restitusjon etter tagging og variasjoner i hjerterate ved lys-mørke og under og etter akutt stress.

Det andre forsøket viser hjerterate og sammenheng med metabolsk rate og haleslagsfrekvens, hvor fisk med hjerte-tag viste lik kritisk svømmekapasitet til fisk uten, samt at det tar ca. et døgn å «lande» hjerteraten etter svømming til utmattelse. Noen fisk klarte ikke «å lande» og bevarte makspuls i dagevis inntil avlivning (se figur).

NTNU har kjørt forsøk på restitusjon etter

Hvas, M., Folkedal, O., Oppedal, F. 2020. *Heart rate bio-loggers as welfare indicators in Atlantic salmon (*Salmo salar*) aquaculture*. *Aquaculture*, 529.

Hvas, M., Folkedal, O., Oppedal. 2020. *Heart rates of Atlantic salmon *Salmo salar* during a critical swim speed test and subsequent recovery*. *J. Fish Biol.*

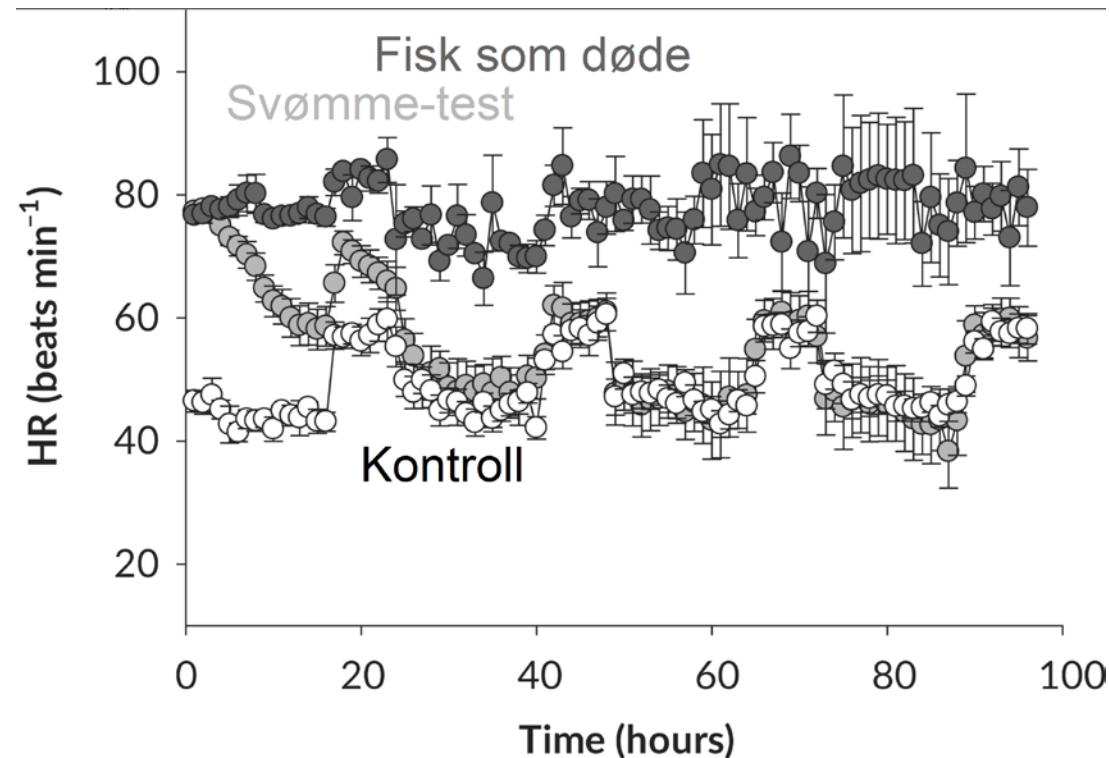
Føre et al., 2021: *Heart rate and swimming activity as indicators of post-surgical recovery time of Atlantic salmon (*Salmo salar*)*. *Animal Biotelemetry*, 9.

Warren-Myers et al., 2021. *Sentinels in Salmon Aquaculture: Heart Rates Across Seasons and During Crowding Events*. *Front. Physiol.*

inn-operering av hjerte-tagger, som viser at det tar i snitt 4 dager for fisken å restituere hjerteraten.

HI/Uni. Melbourne har benyttet hjerte-tagger på stor laks i merder, hvor døgnvariasjon i hjerterate ble sterkt påvirket av sesong/daglengde og etter operasjonelt/akutt stress ved trenging. Det vises også ~20% lavere vekstrate hos laks med hjerte-tag, hvor et senere forsøk har vist at restitusjon av fisk i kar etter tagging kan motvirke denne negative effekten.

Taggen lagrer per i dag data internt (ikke online, og en må finne igjen fisken/taggen), hvor fremtidig utvikling til akustisk tag (online) vil gjøre bruken mer aktuell for fisk i kommersielle merder.



Laksen er fantastisk utholdende!

Fisk sin svømmekapasitet kan defineres på flere vis. Den klassiske metoden er *kritisk svømmehastighet (Ucrit)*. Her utsettes fisk for en stegvis økning i hastighet inntil den utmattes og Ucrit regnes ut fra tiden den har holdt ut på øverste hastighet. Ucrit er meget relevant for å sammenligne svømmekapasitet mellom arter, fiskestørrelser, helse – og stress-tilstand, samt miljøbetingelser. Slike sammenligninger har vært svært nyttig gjennom arbeidet i SFI Exposed.

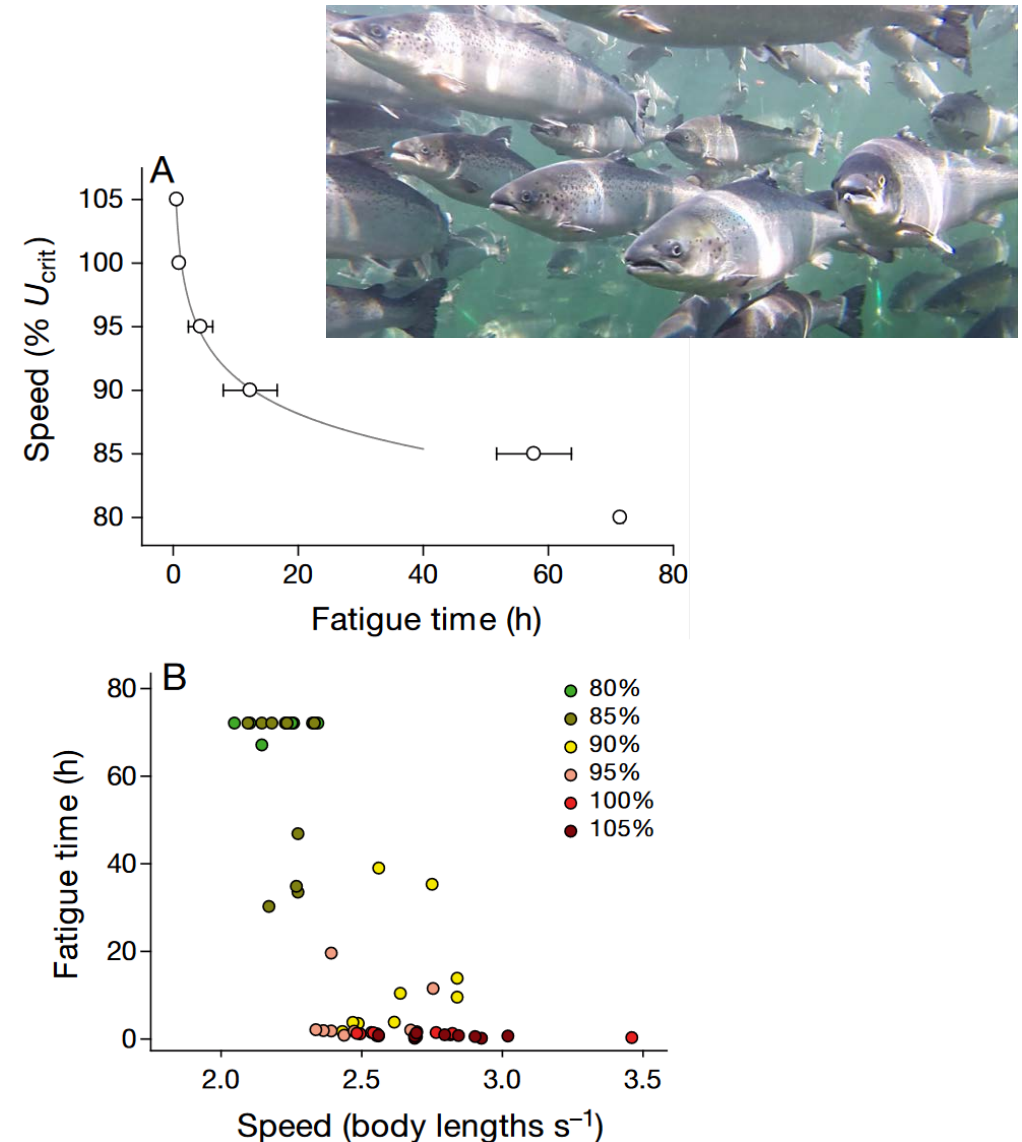
Fiskens *vedvarende svømmekapasitet* tilsier hvor lenge den kan holde ut på en gitt prosent av sin Ucrit. Dette er viktig kunnskap mot eksponert oppdrett, hvor laksen kan oppleve høy vannstrømstyrke over lengre perioder (dager til uker).

Et eksperiment av HI viser at en laksegruppe på ~700 g, hadde en gjennomsnittlig Ucrit på 107 cm s⁻¹. Fisk ble så tvunget til å svømme ved enten 80, 85, 90, 95, 100 eller 105% av gruppens Ucrit i opp til 72 timer. Ved 80 og 85% klarte nesten alle fiskene å holde ut, som tilsier tre døgn på opp til 91 cm s⁻¹. På de høyeste hastighetene ble fisken utmattet innen to timer.

Resultatene viser at laks kan opprettholde en meget høy svømmehastighet over tidsrom som er relevant for strømtopper som følge av uværsperioder. Dette er viktig kunnskap mot lokalitetsvalg og rådgivning til regulerende myndigheter.

Artikler:

Hvas, M., Folkedal, O., Oppedal, F. 2021. *What is the limit of sustained swimming in Atlantic salmon post smolts?* Aquacult. Env. Interact.



Test av haleslag-tag i laks

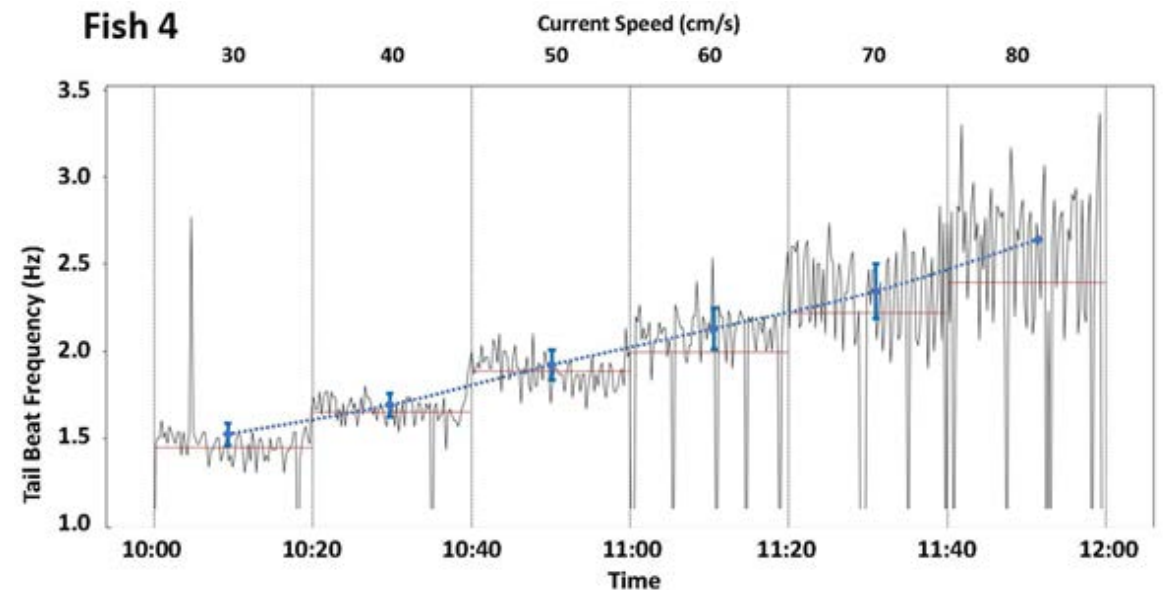
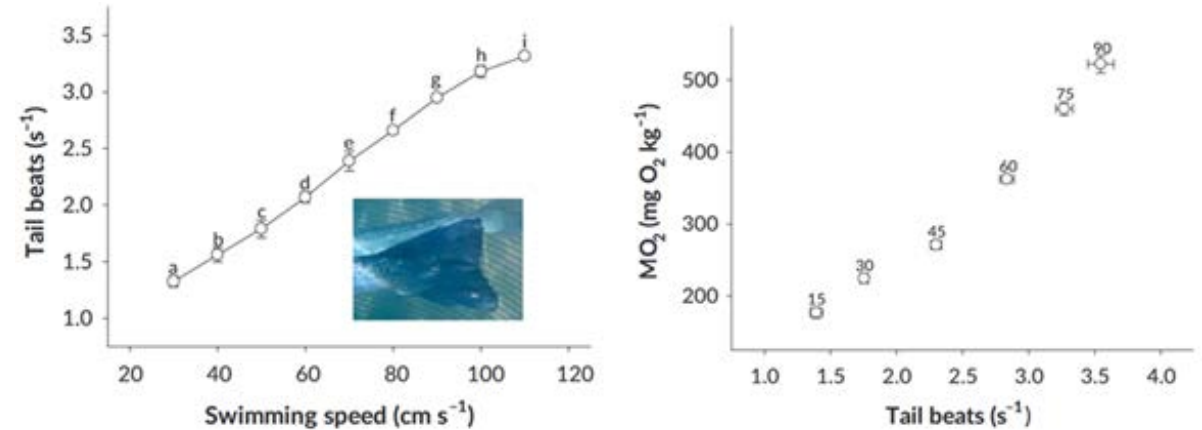
The tailbeat frequency of salmon correspond well with swimming speed and oxygen consumption rates (see. figure from Hvas et al., 2020). Measuring tailbeat frequency in fish tags could therefore be an excellent way of estimating salmon energy use in exposed sea cages.

Using tags that measure acceleration, four salmon were swum, one at a time in a **critical swim speed test (U_{crit})** using a similar test procedure to that of Hvas et al., (2020). In brief, current speed was increased by 10 cm/sec every 20 minutes until fish could no longer maintain constant swimming. The average tailbeat frequency within each 20-minute

period was then compared between measurements recorded from the tag (red line) and observed counts (blue dash) (Fish 4).

Similarly, a **sustained swim speed test** using a similar test procedure to that of Hvas et al. (2021) was conducted.

The results show a good correspondence between tailbeats recorded from the tag and visually observed counts of tailbeat, suggesting that tailbeat should be a future key parameter in the evaluation of fish welfare under exposed conditions.



Artikler:

Hvas et al., 2020: Hvas, M., Folkedal, O., Oppedal. 2020. *Heart rates of Atlantic salmon *Salmo salar* during a critical swim speed test and subsequent recovery.* J. Fish Biol.

Hvas et al., 2021. Hvas, M., Folkedal, O., Oppedal, F. 2021. *What is the limit of sustained swimming in Atlantic salmon post smolts?* Aquacult. Env. Interact.

Analyse av global merdteknologi

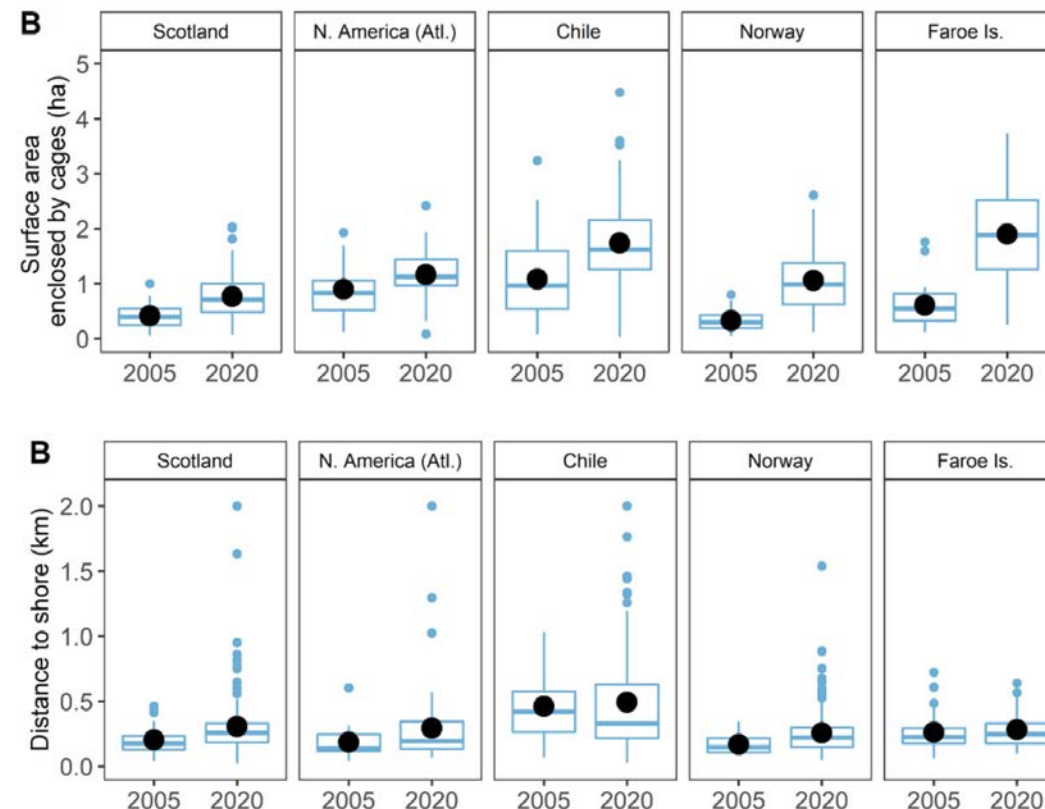
Merdteknologier som brukes til oppdrett av laksefisk antas å ha endret seg både i størrelse og plassering i kystmiljøer, men det finnes bemerkelsesverdig lite data for å forklare denne store utviklingen.

Ved å bruke satellittbilder fra «Google Earth» kartla og målte vi oppdrettsmerder i sjøen og deres posisjoner for å kvantifisere endringer mellom historisk (2005: 2002-2007) og nåværende bruk (2020: 2018-2020) i ulike produksjonsregioner/-land.

Mens antallet merder er temmelig stabilt, er største forskjellen over tid

er at merdstørrelsen har økt (30-220% gitt region), hvor stålmerder i stor grad er byttet ut med plastringer (med unntak av i Chile). Altså, anleggene har blitt betydelig større. Anleggene har ikke forflyttet seg videre ut fra kysten.

Økt størrelse av oppdrettsanlegg har implikasjoner for fiskevelferd, produksjon og miljøeffekter. I arbeidet diskuteres det hvordan de historiske endringene kan påvirke fiskevelferd, produksjon, biosikkerhet og miljøpåvirkninger. Les artikkelen for mange interessante funn og detaljer!



Figurer fra:

McIntosh, P., Barrett, L. T., Warren-Myers, F., Coates, A., Macaulay, G., Szetey, A., Robinson, N, White, C., Samsing, F., Oppedal, F., Folkedal, O., Klebert, P., Dempster, T. 2022. *Supersizing salmon farms in the coastal zone: A global analysis of changes in farm technology and location from 2005 to 2020*. *Aquaculture*. 553.

Laksen unngår bølger

We followed salmon in an exposed salmon cage through the winter 2019-2020 to see how they respond to conditions with both currents and waves.

In this study we used echo sounders located in line with major current flow, allowing us to see both how fish behave in an area with incoming current and an area with outgoing current. We also used video cameras located throughout the cage for more detailed information.

Using these observational methods, we found that salmon prefer to use the entire water column in calm conditions and will only change this preference as a response to waves or daylight. Both waves and daylight cause the salmon to avoid the top 3-5m of the water column, whereas at night and in calm conditions, they will use the top few meters as well.

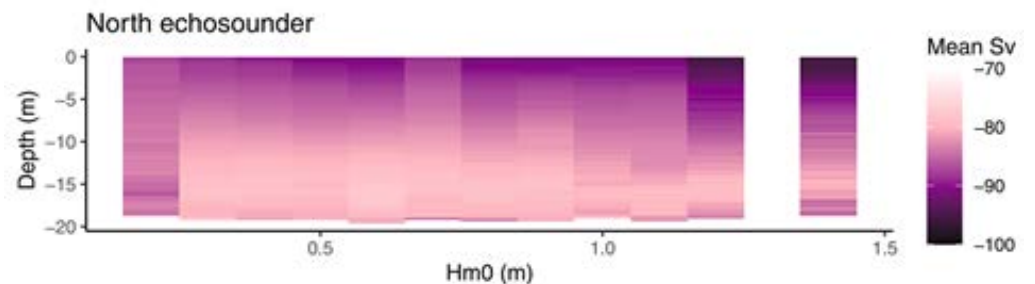
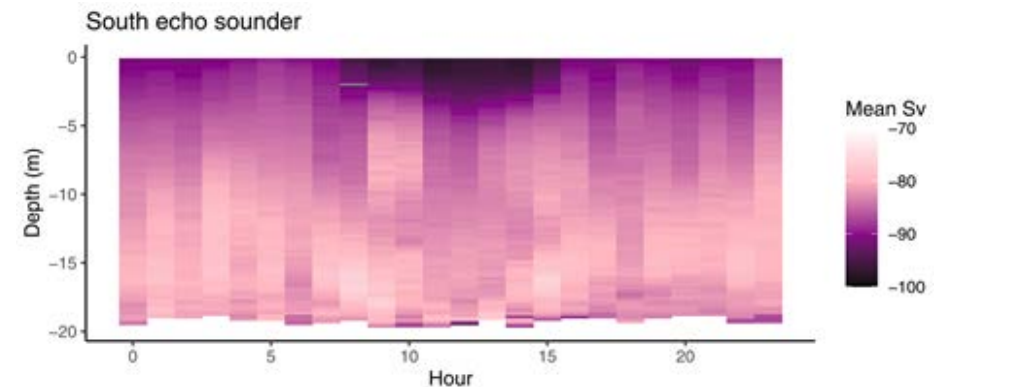
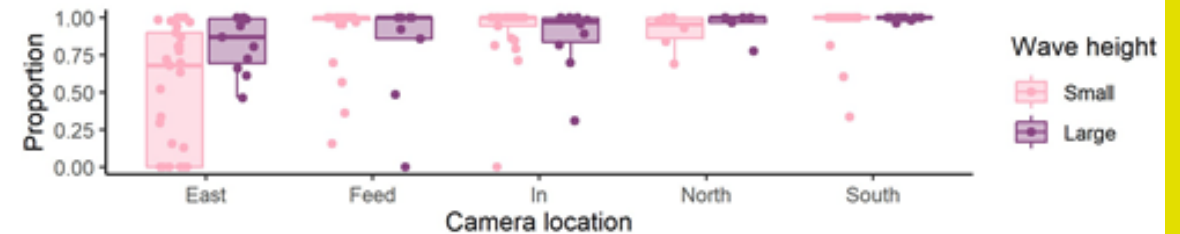
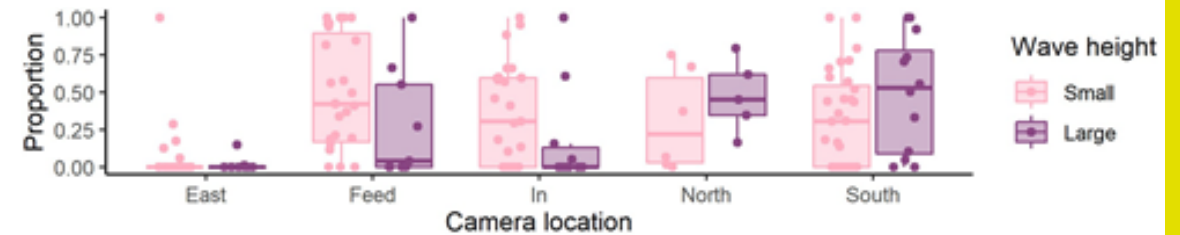
While salmon want to use the whole water column, they have strong horizontal preference. Salmon in this cage preferred to spend their time in the portions of the cage exposed to currents and not in a more sheltered area. However, in large

waves, salmon dispersed from the exposed side of the cage to the more sheltered side.

In strong currents, cage deformation decreases the vertical space in the cage, so salmon are forced to move closer together, but this does not cause the salmon to move to the more sheltered area within the cage.

This indicates that when high density is caused by current deforming the cage, the salmon do not mind the higher density. This is perhaps because the current also creates high water exchange with good water quality.

In conclusion, waves cause a similar avoidance of the surface of the cage as daylight does, and waves will also cause salmon to move to less desirable areas within a cage. Therefore, in addition to considering the decreased available volume caused by cage deformation, salmon farmers ought to allow for decreased accessible volume in large waves.



Figures from:

Johannesen Å, Patursson Ø, Kristmundsson J, Dam SP, Mulelid M, Klebert P (2022) *Waves and currents decrease the available space in a salmon cage.* PLoS ONE 17(2):e0263850.



An aerial, high-angle photograph of the ocean's surface, showing a series of dark, churning waves with white, frothy crests. The perspective is from above, looking down at the water's texture and movement. The word "EXPOSED" is overlaid on the right side of the image in a bold, sans-serif font. The letter 'O' is replaced by a stylized hexagonal logo with a yellow top half and a dark grey bottom half.

EXPOSED