

Aquatrazprosjektet - Sluttrapport

Utvikling av semi-lukket stålmerd
fra konsept til kommersielt produkt

14. februar 2022



AQUATRAZ®

Aquatraz utviklingsprosjekt

Sluttrapport

Forfattere:

Alf Reidar Sandstad¹, Steingrim Holm², Håvard Horn², Torolf Storsul³, Ragnar Thunes¹
og Jan Vidar Aarsnes¹.

¹Seafarming Systems, ²SalmoNor, ³Aqua Kompetanse

Hovedsamarbeidspartnere:

Prosjektponsor/
Prosjektleder



Teknologeier/
Prosjektleder teknologi



Prosjektleder biologi



Innhold

1	Sammendrag	6
2	Innledning	9
2.1	Omfang	9
2.2	Forkortelser	9
2.3	Aquatrazprosjektet	9
2.4	Rapportstruktur	10
2.5	Søknad om utviklingstillatelse	11
2.6	Prosjektmål og delmål	11
2.7	Interne suksesskriterier	12
2.8	Prosjektorganisasjon	13
2.9	Prosjektgjennomføring og hovedmilepæler	14
3	Teknologiutvikling fra konsept til kommersielt produkt	17
3.1	Prosess og aktører	17
3.1.1	Organisering og gjennomføring	17
3.1.2	Teknologipartnere	17
3.1.3	Prosjektgjennomføring	20
3.2	Teknologien	21
3.2.1	Utvikling og fabrikasjon av generasjon 1 til 4	23
3.3	Læringspunkter og designendringer	30
3.3.1	Endringer etter funn under prosjektering og fabrikasjon	30
3.3.2	Endringer etter biologiske funn	32
3.3.3	HMS/Driftserfaringer som har påvirket designet	33
3.4	Egenskaper Aquatraz	37
3.4.1	Navngiving av Aquatraz komponenter	37
3.4.2	Hovedparametere	37

3.4.3	Vannutskiftning	38
3.4.4	Vask, desinfisering og vedlikehold	40
3.4.5	Arbeidsmiljø og drift	40
3.4.6	Støttesystemer	42
4	Dokumentasjon av fiskehelse, fiskevelferd og produksjon	44
4.1	Biologiske måleprogram	44
4.2	Produksjon i Aquatrazmerder	45
4.3	Samarbeidspartnere	47
4.3.1	Produksjonseffektivitet	48
4.3.2	Hjerte- og gjellehelse	48
4.3.3	Lakselus	48
4.3.4	Adferd	49
4.3.5	Vannkvalitet	49
4.3.6	Produktkvalitet	49
4.3.7	Vannstrøm	49
4.3.8	Velferdsvurderinger, div. biologispørsmål og prosjektledelse	50
4.3.9	Om samarbeidet	50
5	Evaluerings av prosjektet vs. interne suksesskriterier	51
5.1	Bedre fiskehelse og fiskevelferd	52
5.1.1	Bedre hjertehelse og kondisjon	52
5.1.2	Bedre gjellehelse	55
5.1.3	Ikke behov for avlusing	57
5.1.4	Lavere stressnivå og skaderisiko ved trenging	59
5.1.5	Bedre velferd og lavere dødelighet	60
5.2	Bedre produktkvalitet	62
5.3	Rømmingssikker teknologi	63
5.4	HMS	64

5.5	Høyere effektivitet/ økonomisk foretrukken teknologi	65
6	Semi-lukket merdteknologi - læring fra prosjektet	69
6.1	Teknologi	69
6.1.1	Beregningsmetodikk for struktur	69
6.1.2	Vannstrøm i merd	71
6.1.3	Måleteknologi og prosedyrer	72
6.1.4	Erfaring fra gjennomføring av forsøk og logging av data	73
6.1.5	Maling, bunnstoff og materialvalg	74
6.2	Erfaringer fra driftsorganisasjonen	74
6.3	Biologi	75
6.3.1	Tilvekst på dagnivå, dødelighet og oksygen	75
6.3.2	Hjertescore	75
6.3.3	Velferdsscore	76
6.3.4	Vannkvalitet	77
6.3.5	Adferd	81
6.4	Kunnskaphull og behov for forskning	84
6.4.1	Trykk og undertrykk	85
6.4.2	Vannstrømhastighet	85
6.4.3	Oksygennivå og biologiske effekter	86
6.4.4	Gjellehelse gjennom sesonger	86
6.4.5	Fôr og fôring i semilukkede enheter med aktiv vannstrøm	86
6.4.6	Slamoppsamling	87
6.4.7	Smittespredning	87
6.4.8	Helse og velferd	88
6.4.9	Utnyttelse av semilukket teknologi	88
6.5	Forskrifter, regelverk og standarder	88
7	Videreutvikling og nye løsninger	90

7.1	Områder med rom for videreutvikling	90
7.1.1	Aquatrazteknologien	90
7.1.2	Nye driftsformer	90
7.1.3	Driftsoptimalisering	92
7.1.4	Egnede lokaliteter	92
7.1.5	Lavere energiforbruk	92
7.1.6	Lavere materialforbruk	93
7.1.7	Redusert arealbruk	93
7.2	År 2050 - hvor bør femdoblingen legges?	94

1 Sammendrag

Hovedmålet til Aquatrazprosjektet er å utvikle Aquatrazmerden, en semi-lukket stålmerd, fra konsept til kommersiell merd, som kan bidra til å løse miljø- og arealutfordringer i akvakulturnæringen. Prosjektet er muliggjort gjennom tilsagn om fire utviklingstillatelser tildelt av Fiskeridirektoratet våren 2017. Utviklingsprosjektet er et samarbeidsprosjekt mellom Seafarming Systems AS, som eier teknologien og Midt-Norsk Havbruk AS, nå SalmoNor AS, som eier merdene og tillatelsene.

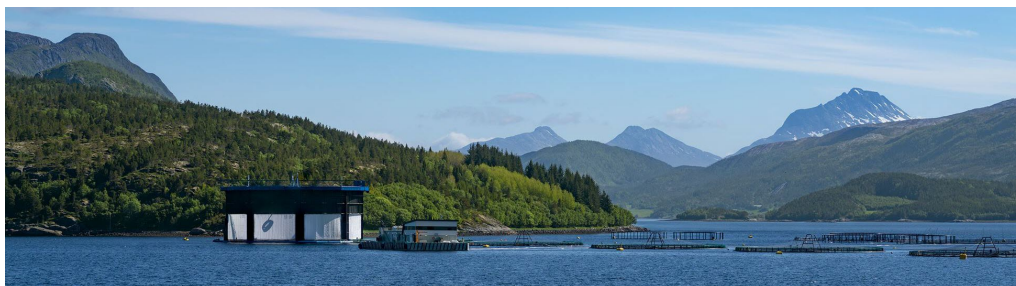
Gjennom prosjektets designiterasjoner, bygging, testing og drift av fire merdgenerasjoner, er Aquatrazmerden utviklet fra konsept til en semilukket stålmerd med kommersiell teknologimodenhet. Aquatraz er klar for markedet!

Resultatene fra Aquatrazprosjektet (case-studier) viser at semilukket merdteknologi kan bidra til å løse flere av hovedutfordringene i akvakulturnæringen, samtidig som det oppnås lavere produksjonskostnader. De reduserte kostnadene er hovedsakelig knyttet til avlusningsfri produksjon. Ved å utnytte stordriftsfordeler med økt antall fisk og større biomasse i merdene vil produksjonskostnadene reduseres ytterligere.

Ved å ta i bruk semilukket teknologi og nye driftsformer kan akvakulturnæringen få en rask og positiv utvikling gjennom en betydelig reduksjon i antall avlusninger. Næringen kan gå fra hendelsesstyrt til planmessig produksjon, som vil være positivt for økonomi, HMS, fiskehelse og fiskevelferd.

Teknologiutvikling fra konsept til kommersielt nivå

Aquatrazmerden er utviklet fra konsept til en kommersiell merd i perioden januar 2017 til desember 2021 gjennom en iterativ tverrfaglig teknologiutviklingsprosess, nærmere beskrevet i kap. 3.



Figur 1: *Aquatraz 4* i Årsetfjorden Foto: Steinar Johansen

Kunnskap og erfaring fra skip og oljeindustrien har vært basis for teknologiutviklingen, og merdene er designet og bygget i henhold til relevante skip- og offshoreregler og standarder. Aquatraz har en designlevetid på 20 år og er verifisert og sertifisert av DNV i henhold til NS9415 og NYTEK forskriften.

Aquatraz har gjennom drift på tre ulike lokaliteter og totalt 14 produksjoner, hvorav 9 fra utsett av laks fra ca. 0,7-2 kg til slakt, vist at teknologien fungerer godt i alle driftsoperasjoner. Drift i regi av utviklingsprosjektet tilsvarer til sammen 10 år operasjonell driftserfaring med Aquatraz. Læring fra hver generasjon er implementert i neste merdgenerasjon og gjennom uttesting og forbedringer for hver generasjon er Aquatrazteknologien utviklet til et kommersielt nivå.

Dokumentasjon av fiskehelse, fiskevelferd og produksjon

Utvikling av ny merdteknologi betinger totalforståelse av produksjonen og særlig biologien da den i stor grad påvirker viktige bærekraftindikatorer, velferdsindikatorer og økonomiske resultat. For hver merdgenerasjon er det, i henhold til målkriterie avtalt med Fiskeridirektoratet, gjennomført et biologisk måleprogram for å dokumentere resultatene fra produksjonen i Aquatraz, samt se på forskjeller mot konvensjonell merd. Kunnskap fra disse programmene har vært viktig i videreutviklingen av hver merdgenerasjon og påfølgende biologiprogram. Totalt fire biologiprogram er utarbeidet og gjennomført i samarbeid med våre samarbeidspartnere, se kap. 4 for nærmere beskrivelse.

Prosjektet søkte og fikk innvilget dispensasjon fra akvakulturdriftsforskriftens §25 Tetthet og §47 a Maksimalt antall fisk, for å gjennomføre tetthetsforsøk med Aquatraz. Tetthet på ca. 30 kg/m³ ble nådd under Vår-19 utsettet på Kyrøyene, mens høyeste antall er ca. 395 000 smolt som ble satt ut i Eiterfjorden i november 2021.

I løpet av prosjektperioden har det vært satt ut totalt ca. 3,8 millioner laks i Aquatrazmerdene, og samlet netto tilvekst har vært ca. 6 400 tonn biomasse.

Evaluerings av prosjektet vs. interne suksesskriterier

I starten av prosjektet ble det etablert interne suksesskriterier med basis i målsetninger definert i søknaden. Suksesskriteriene har vært knyttet til hvordan Aquatraz presterer i forhold til konvensjonelle merder med hensyn til fiskehelse og fiskevelferd, produktkvalitet, rømningssikkerhet, HMS og produksjonseffektivitet. Kriteriene har vært viktige styringskriterier i gjennomføringen av prosjektet. Ved valg og prioriteringer i forbindelse med både biologiprogram og teknologiutvikling har suksesskriteriene blitt brukt aktivt som «ledestjerner». Hvordan prosjektet har prestert i forhold til interne suksesskriterier behandles i kapittel 5.

Evalueringen viser at Aquatrazmerdene presterer tilsvarende eller bedre enn konvensjonelle merder for alle suksesskriteriene.

Læring fra prosjektet

Gjennomføring av Aquatrazprosjektet har bidratt til ny kunnskap og læring innenfor områder som teknologiutvikling, drift og biologisk produksjon av laks i semi-lukkede stålmerder. Dette er nærmere omtalt i henholdsvis kapittel 6.1, 6.2 og 6.3.

I løpet av prosjektet har det dukket opp spørsmål og problemstillinger som ikke har latt seg besvare, og slik sett avdekket både «kunnskapshull» og regulatoriske begrensninger som næring bør ta tak i. Noen av disse er mest relevant for semi-lukkede merder, mens andre er mer allmenngyldige. Problemstillingene omhandler alt fra trykk/undertrykk ved pumping av laks, vannstrømhastighet og effekt på laks i sjøfasen, oksygennivå og biologiske effekter, gjellehelse gjennom sesonger osv. Disse, med flere, er beskrevet i kapittel 6.4.

Aquatraz har vist at teknologien gir lavere produksjonskostnader om dagens akvakulturdriftsforskrift §25 Tetthet og §47 a Maksimalt antall fisk følges, men ved å øke både tetthet og antall individer kan produksjonskostnadene reduseres ytterligere. En forutsetning for at oppdrettere skal ta i bruk ny og bedre teknologi er at produksjonskostnadene er konkurransedyktig med eksisterende teknologi. Ny merdteknologi hvor det er mulig å produsere fisk på en forsvarlig måte med høyere tetthet og bedre rømningssikkerhet bør gis mulighet til å utnytte dette gjennom stordriftsfordeler, dvs. større produksjon (biomasse) å fordele kostnadene på. Begrensning i antall bidrar også til å vanskeliggjøre utvikling av større

anleggskonsepter eller å øke størrelsen på Aquatrazmerden.

Nevnte forskriftskrav bør endres fra absolutte krav til tetthet og antall fisk, til relevante funksjonskrav, samt kvalitativ vurdering av rømningsrisiko. Forskriftskravene bør formuleres slik at de stimulerer til utvikling av ny teknologi som bidrar til god fiskehelse og fiskevelferd gjennom mindre håndtering av fisken, samt reduserer risiko for rømming av fisk.

Videreutvikling av nye løsninger

Utviklingsprosjektet har vist at produksjon i Aquatrazmerder løser mange av utfordringene næringen står ovenfor. Teknologien er fortsatt ny, og mulighetene for ytterligere forbedringer gjennom systematisk teknologiutvikling og drift vil være betydelig. Nå handler det om at næringen tar i bruk ny merdteknologi, som f.eks. Aquatraz, og bidrar til en positiv utvikling, gjennom produksjon av store mengder laks uten avlusing, med lavt energiforbruk og god fiskevelferd.

Gjennom prosjektet har vi gjort oss mange tanker og refleksjoner rundt videreutvikling av Aquatraz, og satsningsområder for semilukket og lukket teknologi for sjø. Noen av disse er nærmere presentert i kapittel 7. Vår hovedpåstand er at hverken hav- eller landbasert oppdrett har tilsvarende potensiale som semilukket og lukket teknologi til å bidra til rask og bærekraftig utvikling i næringen. Oppdrettsnæringen og myndighetene bør derfor benytte tid og ressurser der potensialet er størst og innsatsen lavest til beste for næringen, kysten og nasjonen.

2 Innledning

2.1 Omfang

Aquatraz utviklingsprosjekt ble avsluttet i desember 2021 og denne rapporten beskriver mål for prosjektet, gjennomføring, resultater og funn samt evaluering av disse.

2.2 Forkortelser

AQT	Aquatraz
CFD	Computational Fluid Dynamics (analyses)
CO ₂	Karbondioksid
CTDO	Måleinstrument for salinitet, temperatur, dybde og oksygen
G1, G2...	Merdgenerasjoner
MNH	Midt-Norsk Havbruk
O ₂	Oksygen
ROV	Remotely operated vehicle, fjernstyrt undervannsfarkost
SFS	Seafarming Systems
TAN	Total ammonium nitrogen
TOC	Totalt organisk karbon
TSS	Totalt suspendert stoff
VF3	Vekstfaktor 3 (Thermal Growth Coefficient , TGC)

2.3 Aquatrazprosjektet

Ideen til Aquatrazmerden er mer enn 20 år gammel, og ble unnfanget av Alf Reidar Sandstad da han jobbet som røkter ved Val videregående skole i Nærøysund 1994/1995. Hensikten med løsningen var å eliminere fiskerømming, bedre arbeidsmiljøet og forenkle instrumentering og automatisering.

I 2004 etablerte Sandstad selskapet Seafarming Systems som eier teknologien og som i februar 2016 inngikk samarbeidsavtale med Midt-Norsk Havbruk AS om å søke på utviklingstillatelser for å videreutvikle Aquatrazkonseptet. Søknad ble utarbeidet i felleskap og innsendt til Fiskeridirektoratet i mars 2016.

Midt-Norsk Havbruk AS fikk den 28.04.2017 tilsagn om fire utviklingstillatelser fra Fiskeridirektoratet for å utvikle Aquatrazkonseptet, en semilukket stålmerd, til en kommersiell merdløsning. Formålet med utviklingstillatelsene er å legge tilrette for utvikling av ny teknologi som kan bidra til å løse en eller flere av miljø- og arealutfordringene som akvakulturnæringen står ovenfor.

Aquatrazprosjektet er et samarbeidsprosjekt mellom Seafarming Systems AS (teknologieier) og Midt-Norsk Havbruk AS, nå SalmoNor (oppdretter/eier av tillatelsene).

2.4 Rapportstruktur

Denne rapporten inngår som et av flere målkriterier som skal være oppfylt før søknad om konvertering av utviklingstillatelsene kan sendes inn til Fiskeridirektoratet. I henhold til målkriterie 9.1 i tilsagnet fra Fiskeridirektoratet; *Sluttrapporten skal inneholde en evaluering av prosjektet med basis i resultatene fra måleprogrammet samt interne suksesskriterier med tanke på kommersialisering av Aquatraz*".

Hensikten med denne rapporten er å gi en evaluering av prosjektet i samsvar med målkriterie 9.1. I tillegg ønsker vi å formidle læring fra prosjektet som kan ha relevans for andre oppdrettere, myndigheter og aktører som jobber med semilukket teknologi, samt gi innspill til områder hvor vi, basert på erfaring fra prosjektet, mener at det bør gjøres en innsats for å øke kunnskapsgrunnlaget i næringen.

Kapittel 2 oppsummer bakgrunn for prosjektet, prosjektmål og interne suksesskriterier, samt hvordan prosjektet, på et overordnet nivå, har vært organisert og gjennomført.

I kapittel 3 beskrives det teknologiske utviklingsløpet fra konsept til kommersiell merd. Våre viktigste samarbeidspartnere innen teknologiutvikling og hva de har bidratt med inn i Aquatrazprosjektet presenteres nærmere.

Kapittel 4 omhandler fiskehelse, fiskevelferd og produksjon gjennomført i Aquatrazmerder og tilhørende referansemarder. Biologiske måleprogram som er gjennomført for hver merdgenerasjon beskrives nærmere. Videre presenteres våre viktigste samarbeidspartnere innen biologi og hva de har bidratt med i prosjektet.

Prosjektet etablerte interne suksesskriterier i starten av prosjekt. Hvordan prosjektet har prestert i forhold til disse evalueres i kapittel 5.

Kapittel 6 omhandler læring fra prosjektet som kan ha betydning for annen semilukket teknologi og næringen som helhet. Gjennom problemstillinger det er jobbet med i prosjektet, er det avdekket flere områder hvor kunnskapsgrunnlaget er mangelfullt og hvor det er behov for mer forskning.

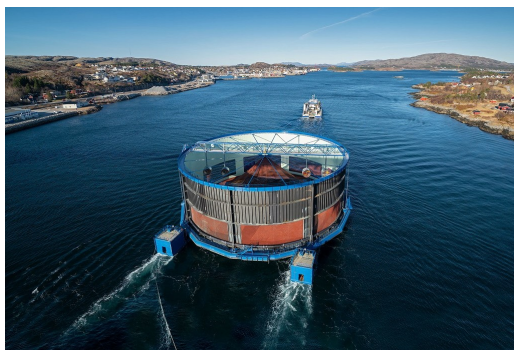
Gjennom utviklingsprosjektet har vi vist at produksjon i Aquatrazmerder løser mange av utfordringene næringen står ovenfor, samtidig som produksjonskostnadene er redusert i forhold til konvensjonelle merder. Nå handler det om at næringen tar i bruk teknologien slik at den kan videreutvikles gjennom erfaring fra drift og nye driftsmetoder. I kapittel 7 reflekteres det rundt videreutvikling av Aquatrazteknologien og nye løsninger.

2.5 Søknad om utviklingstillatelser

Søknaden om utviklingstillatelser for Aquatrazkonseptet beskrev et utviklingsløp bestående av sju faser fra konsept til kommersielt produkt, hvor erfaring fra tidligere faser skulle implementeres i neste generasjon merd inntil teknologimodenheten kom til et kommersielt nivå. De syv fasene i prosjektet ble videre inndelt i fire hovedkategorier:

1. Konseptfase
2. Pilotfase
3. Storskalafase 1, 2, 3 og 4
4. Slutfase

Erkjennelsen av at design og utvikling av produkter er iterative prosesser, er årsaken til at det ble søkt om et utviklingsløp. Hvor mange iterasjoner eller faser som er nødvendig før produktet når kommersiell teknologimodenhet er vanskelig å forutse i starten av et utviklingsløp.



Figur 2: Slep av *Aquatraz 2* gjennom Nærøysundet. Foto: Steinar Johansen

I prosjektet er det gjennomført seks faser. Pilotfasen og storskalafase 1 ble slått sammen til én fase, basert på resultatene fra modellforsøkene i havbassenget til Sintef Ocean. Mellom hver fase ble erfaringer fra foregående fase(r) evaluert før beslutning om neste fase. Prosjektplanen er derfor justert underveis basert på erfaring og læring fra tidligere faser, for å sikre at prosjektet leverer i forhold til hovedmålsetningen.

Figur 2 viser slep av *Aquatraz 2*, første generasjon Aquatraz, på pongtongene *Akva* og *Traz* gjennom Nærøysundet.

Utviklingstillatelsene fra Fiskeridirektoratet har vært helt avgjørende for realiseringen av Aquatrazprosjektet. Seafarming Systems hadde før dette prosjektet jobbet med å kommersialisere teknologien i mer enn 15 år uten å lykkes. Risikoavlastningen som utviklingstillatelsene representerer har vært en forutsetning for Midt-Norsk Havbruks deltagelse og finansiering av utviklingsprosjektet.

2.6 Prosjektmål og delmål

Hovedmålsetningen til prosjektet har vært å utvikle Aquatrazkonseptet til et kommersielt produkt som kan bidra til å sikre bærekraftig drift og utvikling i havbruksnæringen. I tillegg til hovedmålet er det i søknaden om utviklingstillatelser definert delmål innen teknologi og biologi, som har vært styrende for gjennomføring av prosjektet.

Innen teknologi har delmålene med tilhørende problemstillinger vært;

1. **Detaljkonstruksjon Aquatraz**

Hvordan skal merden utformes for å oppnå best mulig totalsystem?

2. **Lage en mer rømningssikker merd**

Hvilke områder må det fokuseres på for å gjøre en merd rømningssikker?

3. **Bruke pumpesystem for å tilpasse miljøforholdene i merden**

Hvordan skal pumpesystemet utformes for best mulig å trene fisk, skape et godt vannmiljø og samtidig være energieffektivt?

4. **Verifisering av konseptet på forskjellige lokaliteter**

Hvordan vil Aquatraz fungere på forskjellige lokaliteter?

5. **Markedsimplementering**

Hvordan skal Aquatraz kommersialiseres for å oppnå rask implementering i oppdrettsnæringen?

Hvordan prosjektet har jobbet med disse problemstillingene under utviklingen av Aquatrazmerdene er nærmere beskrevet i kapittel 3.

Innen biologi har delmålene med tilhørende problemstillinger vært:

1. **Forbedre fiskens kondisjon og helse**

Hvordan vil trening av fisk påvirke fiskens helse?

2. **Redusere forekomst av stress og skader på fisk grunnet trenging**

Hvordan kontrollere trenging ved håndtering, lasting og transport av fisk?

3. **Redusere lusepåslag på fisk**

Hvordan skal Aquatraz utformes for best mulig eliminering av lusepåslag?

4. **Forbedre gjellehelse**

Kan det utvikles løsninger i Aquatraz som bedrer gjellehelsen?

De biologiske problemstillingene som er beskrevet over danner basis for biologiprogrammene som er utarbeidet i samarbeid med våre partnere innen biologi. Hvordan problemstillingen er hensyntatt i biologiprogrammene er nærmere beskrevet i kapittel 4.

2.7 Interne suksesskriterier

Delmålene beskrevet i kapittel 2.6 danner basis for de interne suksesskriteriene som er definert av prosjektet. Både hovedmål, delmål og suksesskriteriene er utarbeidet i samarbeid mellom Seafarming Systems og Midt-Norsk Havbruk. Felles mål og forståelse for hva som er suksesskriteriene til prosjektet har vært en forutsetning for å lykkes med gjennomføringen .

Felles mål og interne suksesskriterier har bidratt til gode og effektive beslutningsprosesser, samt lagt grunnlaget for et godt samarbeidsklima i prosjektet. Dette sammen med en liten prosjektorganisasjon med delegert ansvar og myndighet gjør at prosjektgjennomføringen har vært svært effektiv.

De interne suksesskriteriene har vært en rettesnor i gjennomføringen av prosjektet og påvirket beslutninger innen både teknologiutvikling og utarbeidelse av biologiske måleprogram. I Aquatrazprosjektet er følgende suksesskriterier definert:

1. Bedre fiskehelse og fiskevelferd:

- Bedre hjertehelse og kondisjon
- Bedre gjellehelse
- Ikke behov for avlusing
- Lavere stressnivå og skaderisiko ved trenging
- Bedre velferd og lavere dødelighet

2. Bedre produktkvalitet

3. Rømmingssikker teknologi

4. Forbedret HMS

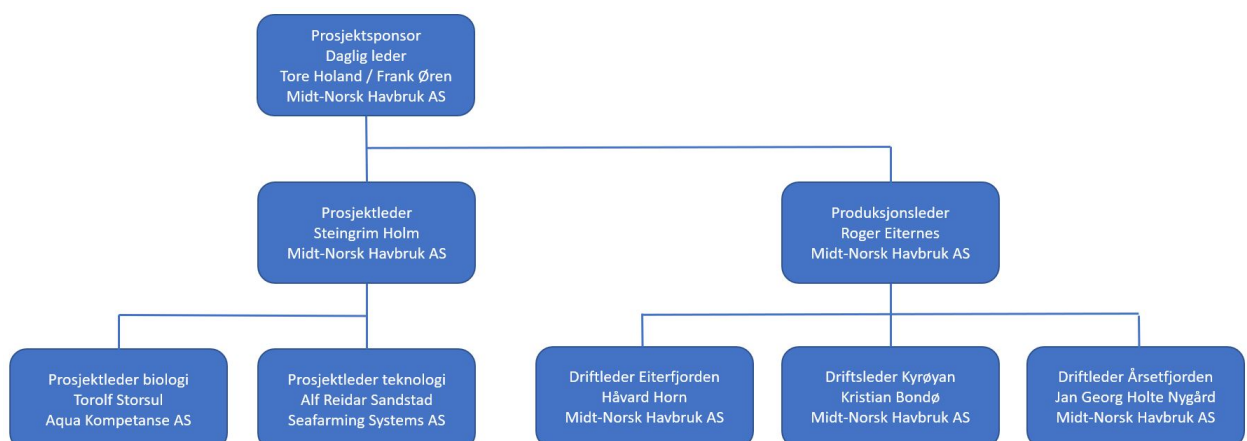
5. Høyere effektivitet/ økonomisk foretrukken teknologi

Hvordan prosjektet har prestert i forhold til suksesskriteriene evalueres i kapittel 5.

2.8 Prosjektorganisasjon

Aquatrazprosjektet er finansiert og ledet av Midt-Norsk Havbruk AS (prosjektsponsor og prosjektleder). Teknologiutviklingen av Aquatraz er ledet av prosjektleder teknologi fra Seafarming Systems AS, mens oppfølging av biologisk måleprogram er ledet av prosjektleder biologi fra Aqua Kompetanse AS, se figur 3.

Drift av merdene har vært underlagt produksjonsleder i Midt-Norsk Havbruk AS. Det har ikke vært en egen driftsorganisasjon i prosjektet. Aquatrazmerdene er designet for å kunne benyttes i standard rammefortøyninger og har vært driftet på tre forskjellige lokaliteter sammen med konvensjonelle merder.



Figur 3: Prosjektorganisasjon

Driftsleder på de respektive lokalitetene har vært ansvarlig for daglig drift og oppfølging av biologisk produksjon i både Aquatraz og de konvensjonelle merdene. Dette var et bevisst valg for å sikre at driftorganisasjonen i Midt-Norsk Havbruk skulle få eierskap til teknologien og lære seg å drifte merdene i løpet av prosjektperioden. Organiseringen har videre bidratt til uvurderlige innspill i utviklingsprosessen fra driftsledere og andre personer i driftsorganisasjonen hvor de har delt sin erfaring og kunnskap i alle faser fra design, bygging, testing og drift av Aquatrazmerdene.

Det faste prosjektteamet har bestått av få personer, som har jobbet tett sammen gjennom hele prosjektet. Prosjektponsor, Midt-Norsk Havbruk, ga prosjektet stor frihet til å gjennomføre prosjektet for å nå målsetningene. Midt-Norsk Havbruk var en ubyråkratisk organisasjon og kommunikasjonen mellom driftsorganisasjonen og prosjektet fungerte svært godt. Erfaring og utfordringer i drift har kommet ufiltrert fra ansatte på merdkanten til prosjektet, slik at endringer og forbedringer raskt kunne bli implementert i neste versjon eller utbedres på eksisterende merder. Prosjektets betydelige tekniske utvikling og kunnskapsgenerering kan i stor grad tilskrives det tette samarbeidet mellom drifts- og prosjektorganisasjonen. Godt samspill mellom utvikler og sluttbruker er essensielt for å lykkes med utvikling av ny teknologi.

Den faste prosjektorganisasjonen er liten og prosjektet har derfor vært avhengig av å knytte til seg gode samarbeidspartnere både innenfor teknologi og biologi. Samarbeidet med prosjektets viktigste samarbeidspartnere er nærmere omtalt i henholdsvis kapittel 3.1.2 og 4.3.

2.9 Prosjektgjennomføring og hovedmilepæler

Søknaden beskriver en gjennomføringsmodell bestående av sju faser, ref. kapittel 2.5. Prosjektet startet primo januar 2017 med konseptfasen, fire måneder før tilsagn om utviklingstillatelse ble gitt. I tillegg er fire storskalafaser gjennomført i løpet av en prosjektperiode på totalt fem år, se figur 4 som viser tidslinjen for prosjektet med hovedmilepæler.



Figur 4: Tidslinje Aquatraz utviklingsprosjekt

Gjennomføringen av Aquatrazprosjektet har gått raskere enn hva en så for seg under søkeprosessen. Årsaken til dette er flere, men de viktigste faktorene er;

- Liten, men kompetent prosjektorganisasjon, med delegert ansvar og myndighet til å gjennomføre prosjektet for å nå prosjektmålene
- Aquatrazkonseptets modenhet ved start, samt at prosjektet startet før tilsagn ble gitt
- Kontrahering av totalt fire Aquatrazmerder i perioden 11/2017 - 01/2018

Prosjektsporsors klare delegering av ansvar og myndighet til prosjektledelsen er en av hovedårsaken til den raske gjennomføringen, sammen med en liten, men kompetent, prosjektorganisasjon. Denne kombinasjonen er effektiv forutsatt at personkjemien i prosjektgruppen stemmer og at ingen faller i fra. Aquatrazprosjektet er imidlertid gjennomført uten utskiftninger i prosjektteamet, og både prosjektleder teknologi og prosjektleder biologi var viktige bidragsyttere i utarbeidelsen av søknaden om utviklingstillatelser i 2016. Prosjektledelsen har således hatt et sterkt eierskap og inngående kjennskap til prosjektet fra dag en.

Ideen til Aquatrazkonseptet var ved prosjektstart ca. 20 år gammel og hadde allerede vært gjenstand for mange iterasjoner på konseptnivå før prosjektet startet. Dette, sammen med prosjektstart før tilsagn ble gitt, muliggjorde validering av pilotmerden i havbassenget til Sintef Ocean allerede i juli 2017, kun tre måneder etter tilsagn.

Ved årsskiftet 2017/2018 kontraherte Midt-Norsk Havbruk totalt fire stk. 1. generasjon Aquatrazmerder ved Fosen Yard. Intensjonen var å produsere fire like merder, men basert på læring fra analyser og produksjon av merd nr. 1 ved verftet, ble det besluttet å endre design for merd nr. 3 og 4, se kapittel 3.2 for mer utfyllende informasjon.

Tidlig i prosjektet oppstod et tett og tillitsbasert samarbeid med byggeverftet Fosen Yard og underleverandør for stålproduksjon, MCP (Maritime Construction Partner), noe som bidro til aksept for å endre designet for merd 3 (2. generasjon) og merd 4 (3. generasjon) midt i byggeprosessen. Dette medførte at prosjektet sparte minst to år i forhold til en seriell kontrahering av merder, med ny kontrakt for hver generasjon. I tillegg til å spare tid avlastet dette prosjektorganisasjonen og la slik til rette for økt fokus på teknologiutviklingen.

Utviklingsløpet har foregått over relativt kort tid og vært intenst. Vår erfaring er at dette har bidratt til økt fokus på prosjektet både fra utvikler, egen driftsorganisasjon og våre samarbeidspartnere. Dette har sannsynligvis bidratt til et bedre sluttprodukt, samt raskere kommersialisering av Aquatrazteknologien, noe vi anser som positivt for næringen.

3 Teknologikutvikling fra konsept til kommersielt produkt

Med innføringen av utviklingstillatelser har flere oppdrettsselskaper i løpet av svært kort tid gått fra å være nettopp oppdrettsselskaper til også å bli utviklingsselskaper for store utviklingsprosjekter. Dette er en rolle som krever ny kompetanse og, som oftest, betydelige endringer i organiseringen. Manglende tidligere erfaring og kompetanse i kombinasjon med store og kostbare prosjekter gir høy risiko. Med dette som bakteppe ønsker vi å dele våre erfaringer knyttet til utvikling av ny teknologi og slik forhåpentligvis bidra til å redusere risikoen for de som kommer etter oss.

Det er valgt å gjøre dette gjennom en generell innledende beskrivelse av prosjekts oppbygning, organisering og gjennomføringsmodell før teknologien beskrives på et overordnet nivå. Videre dekkes utviklingen av den første merden i kronologisk rekkefølge frem til drift, mens det for de siste generasjonene presenteres erfaringer som medførte designendringer og litt om hvordan disse ble håndtert. Avslutningsvis beskrives egenskapene til «sluttproduktet» Aquatraz.

Utviklingsmetodikken og fasene som ble benyttet er ingen fasit, men våre erfaringer med gjennomføringsmodellen er gode.

Å utvikle ny teknologi er en spennende, men også krevende prosess som krever mye av alle involverte. Dette har også vært tilfellet i Aquatrazprosjektet, men vi har unngått konflikter, lært mye og forhåpentligvis utviklet en teknologi næringen vil ha nytte av!

3.1 Prosess og aktører

Gjennomføring av teknologi-delen av Aquatrazprosjektet med vekt på strategier, verktøy og aktører/partnere er beskrevet i det følgende.

Overordnet organisering av prosjektet samt tidslinjen for gjennomføringer er beskrevet i kapittel 2.8 og 2.9 og behandles ikke her.

3.1.1 Organisering og gjennomføring

Aquatraz er som bekrevet tidligere utviklet over fire merdgenerasjoner, og prosjektorganisasjonen har bestått av en teknologigruppe i tillegg til en gruppe for biologi. Begge gruppene har rapportert til prosjektleder.

Kontaktpunktene mellom biologi- og teknologigruppene har vært mange og kommunikasjonen har vært god, noe som har vært avgjørende for graden av suksess gjennom prosjektet.

3.1.2 Teknologipartnere

Aktørene listet opp under har i større eller mindre grad vært involvert i teknologi-delen av Aquatraz-prosjektet.

Seafarming Systems

Eierskapet til teknologien og ansvaret for den tekniske utviklingen av Aquatraz ligger hos selskapet Seafarming Systems (SFS). Selskapet har gjennom prosjektet vært ansvarlig for følgende leveranser:

- Konseptutvikling (G1 til G4 samt nedsenkbare lektere)
- Hydrodynamikk (alle last- og bevegelsesberegninger for G1 til G4 samt nedsenkbare lektere inkludert, koordinering av modelltanktester og fullskalaforsøk)
- Fortøyning (tidligfase fortøyningsanalyser for G1 til G4)
- Strukturanalyser (beregninger for G1 til G4 og nedsenkbare lektere, planlegging av fullskala strukturforsøk, anodeberegninger, ansvarlig for strukturdisiplinen i modelltest og fullskalaforsøk)
- Ståldesign (design av stålstruktur for G1 til G4 og nedsenkbare lektere)
- Stabilitet (beregninger G1 til G4 og nedsenkbare lektere)
- Mekanisk design (vinsjer, strømsetterdyser og supportstruktur G1 til G4)
- Elektrodessign (reservekraftaggregater, landkabel, motordrifter og distribusjoner G1 til G4)
- Fabrikasjonsoppfølging (G1 til G4 og nedsenkbare lektere)
- Systemutvikling (dokumenthåndteringssystem og samhandlingsverktøy)
- Dokumentasjon (brukermanualer, Manufacturing Record Book (MRB), Supplier Master Document Register (SMDR))

For kompetanseområder utenfor disse er det benyttet underleverandører. Bidraget fra disse har vært essensielt gjennom hele prosessen. De viktigste samarbeidspartnerne innen design og utvikling har vært:



Gjennom hele prosjektet fra tidligfase til drift har prosjektet samarbeidet med og benyttet tjenester fra DNV. Som del av designprosessen deltok DNV i arbeidet med å definere regelverk og standarder og har bistått med hazardgjennomgang for alle generasjoner. DNV var også ansvarlig for designverifikasjon og sertifisering av merdene. Under fabrikasjon ved Fosen Yards i Rissa og ved Focus Construction i Vietnam bisto DNV med byggetilsyn.



I utviklingen av merden har simulering av vannets bevegelser i og utenfor merden bidratt til økt forståelse av den svært komplekse dynamikken i slike systemer. Dette arbeidet er utført av CFD Marine i Tvedestrand som har kjørt flere hundre analyser. Den økte forståelsen fra analysene har redusert behovet for fullskala tester, bidratt til raskere måloppnåelse og gitt betydelige kostnadsbesparelser.



I tillegg til CFD-analyser er to merdgenerasjoner testet i havbassenget hos Sintef Ocean på Tyholt. Resultatene fra forsøkene er så benyttet til å kalibrere de numeriske lastberegningene som benyttes i strukturanalysene. Bassengtestene har også vært brukt til å verifisere deler av CFD-analysene.



For hver av de fire generasjonene har SFS etablert 3D-modeller som er anvendt i både interne og eksterne møter og workshops fra tidlig konseptfase til detaljdesign. Modellene er videre benyttet av Focus Group til å ekstrahere detaljtegninger benyttet av DNV i designverifikasjon, og av verft for prising og som byggeunderlag. For vinsjer og strømsettere har Focus Group bidratt med ståldesign, 3D-modellering, detaljprosjektering, tegningspakkene og fabrikasjon ved eget verksted i Ho Chi Minh, Vietnam.



Analysen av fortøyningslaster når Aquatraz ligger i rammefortøyning er utført av Aquastructures i samarbeid med SFS. Selskapet har også bidratt med dynamiske analyser av presenninger og nøter for generasjon 3 og 4.



Sea Systems bistod på første generasjon med konseptutvikling, detaljprosjektering og installasjon av løftesystemet.



Første generasjon av løftesystemet, brukt på merder av generasjon 1, er et hydraulisk system. For generasjon 2 ble det utviklet et elektrisk løftesystem bestående av fire synkronopererte vinsjer. Softwareutvikling og kraftelektronikk ble utført og levert av Wi Innovate.



Fosen Yard AS ble tildelt kontrakt på bygging av fire Aquatrazmerder etter en grundig evaluering av flere alternativer. I tillegg til kost og leveringstid har verftet en «can do» tilnærming som ble ansett som særlig viktig i et utviklingsprosjekt, hvor endringer vil være en vesentlig del av jobben. Deres evne til å snu seg rundt og håndtere store endringer er imponerende og har vært en avgjørende for utviklingen av merdene. Verftet ble tidlig involvert i designutviklingen og har fra første dag også bidratt innenfor dette området med gode innspill og endringsforslag.



Som del av detaljprosjekteringsarbeidet bør også fabrikkasjonsvennlighet inngå, og dette krever involvering av de som skal utføre jobben. MCP var verftets underleverandør innen blant annet sveise- og platearbeid. De ble derfor involvert i siste del av prosjekteringsfasen og bidro med viktige innspill. Både under og etter fabrikasjon av de ulike enhetene har det gode samspillet med MCP bidratt til designforbedringer som igjen gjør Aquatraz til en fabrikkasjonsvennlig enhet.



I prosjektet ble designlevetiden satt til 20 år. Dette setter krav til et godt malingsystem både med tanke på malingsproduktene, og i minst like stor grad til forberedelsene før påføring og selve malingsjobben. Jotun ble involvert tidlig i prosjektet for å sikre at deres innspill knyttet til utforming av merden kunne tas inn i designet. De utarbeidet også malingsspesifikasjonen og bidro med inspeksjoner på verftet for å sikre at denne ble fulgt.

3.1.3 Prosjektgjennomføring

For å sikre god samhandling mellom underleverandører, prosjektorganisasjon og driftsorganisasjon utviklet og administrerte SFS et dokumenthåndteringssystem, samt et samhandlings- og informasjonsdelingsverktøy for den tekniske delen av prosjektet. Systemene har fungert godt, men det er menneskene som må gjøre jobben. Mye arbeid ble derfor lagt ned i å involvere personer med relevant kompetanse og å etablere arenaer samt arbeidsmetodikk som skulle bidra til kunnskapsdeling og erfaringsoverføring i alle faser. Følgende arenaer er benyttet aktivt:

- Design reviews og workshops fra tidligfasedesign til detaljdesign
- Hazider
- Risikogjennomganger
- Fysiske møter og Teams-møter for spesifikke temaer
- Fabrikktesting av produkter hos underleverandører

Arenaene har i tillegg til kunnskapsdeling og nyttig meningsutveksling bidratt til at folk ble bedre kjent, og dermed også ført til flere og bedre diskusjoner samt mer samhandling både i og utenfor møtene.

I tillegg til gode verktøy, relevant kompetanse og arenaer for samhandling er det viktig at utviklerne i et slikt prosjekt etablerer eierskap og inngående kjennskap til produktet. Designteamet har derfor vært til stede i felt på verft, under slep, under drift og ved spesielle operasjoner som for eksempel mottak og lossing av fisk.

På samme måte er det viktig at driftsorganisasjonen involveres i selve utviklingsprosessen, og driftspersonell har deltatt på de aller fleste møter og hatt direkte tilgang til samhandlingsverktøyet hvor de blant annet har spilt inn endringsforslag og erfaringer, som designteamet må kvittere ut. I fabrikkfasen ble det vektlagt at ulike deler av driftsorganisasjonen og designere var på verftet samtidig. Slik ble den felles forståelsen av teknologien og bekjentskapene styrket, samtidig som prosjektet dro nytte av de ulike synsvinklene til å forstå styrker, svakheter og muligheter i konseptet.

Samhandlingsverktøyet er også benyttet direkte mot eksterne som ble gitt tilgang til deler av informasjonen. Eksempelvis ble alle aksjoner knyttet til fabrikkjonskontroll delt direkte med verftets nøkkelpersoner. På samme måte ble det opprettet egne kanaler hvor

driftserfaringer ble logget og diskutert i en utvidet prosjektgruppe bestående av røktere, prosjektledelse og designere.

Arbeidsmetodikken og samhandlingsverktøyet har bidratt til at konflikter er unngått, skapt en felles forståelse for hvor det er behov for forbedringer samt enighet om og eierskap til de valgte løsningene. Dette er ikke en selvfølge i utviklingsprosjekter og kanskje særlig ikke i prosjekter som dette med mange disipliner, store endringer og et stramt tidsskjema. Et eksempel på dashboard for enklere tilgang til informasjon og samhandling er vist i figur 5.



Figur 5: Dashboard for prosjekt Aquatraz G4

3.2 Teknologien

Utviklingen av Aquatrazmerdene startet allerede i 1995 og kan deles i to perioder. Første periode pågikk fra 1995 til 2004, mens andre periode startet i 2016 som følge av samarbeidet med den gang Midt-Norsk Havbruk om å søke utviklingstillatelser.

Bakgrunnen for at Sandstad på midten av 1990-tallet mente det var behov for å utvikle en merd i stål er i stor grad fortsatt gjeldende. Rømning av laks og lakselus var også et problem den gang, og datidens fleksible merder var på samme måte som i dag vanskelige å automatisere og videreutvikle grunnet store relative bevegelser og få eller ingen faste punkter for innfesting av utstyr.

For forsvarlig og effektiv drift måtte det også den gang utvikles en god løsning for inspeksjon, vask, desinfeksjon og vedlikehold uten bruk av dykkere eller undervannsoperasjoner. Løftesystemet har derfor vært en bærende del av løsningen i over 25 år. Materialvalget er også uforandret da stål fortsatt har følgende fordeler:

- Lave kostnader sammenlignet med andre alternativer
- Sikkert valg da det eksisterer mye kunnskap om hvordan stål på best mulig måte designes, fabrikkeres og vedlikeholdes
- Robust mht. skader
- Enkelt å fabrikkere, modifisere og god tilgang til personell med utstyr og kompetanse for endringsarbeid og reparasjoner

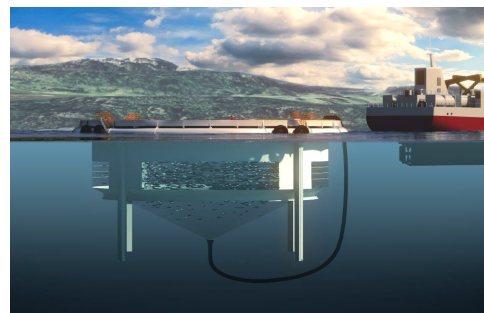
- Resirkulerbart og miljøvennlig.

Ved utvikling av ny merdteknologi påvirker miljølasten i stor grad designet. En optimalisert merd designet for beskyttede lokaliteter vil eksempelvis bygges med tynnere plater og gi en lettere struktur sammenlignet med en merd beregnet for bruk på åpent hav. Også støttesystemer som løsninger for fiskehåndtering, føring og overvåkning vil være ulikt og mer kostbart på eksponerte lokaliteter. Som følge av et ønske om å utvikle en kostnadseffektiv løsning er Aquatraz designet for drift på beskyttede lokaliteter med høy opp til ca 2,5m (kan økes, men gir økt kost). Det var også viktig å legge til rette for at eksisterende standardutstyr kunne benyttes i merden. Dette er videreført og Aquatraz er fortsatt tilpasset konvensjonelle fortøyninger, førings- og dødfisksystemer.

I periode 2 av utviklingen ble den øvre delen av merden lukket for å gi bedre lusebeskyttelse. Dette medførte også behov for aktiv vannutskiftning.

Da søknaden om utviklingstillatelse ble skrevet hadde merden karakteristika som listet opp under. Figur 6 til høyre viser et 3D-bilde av merden brukt i søknaden.

- Luseskjørt i stål
- Stivt sidepanel (rister)
- Flytekrage i stål med tilhørende løfte-system for heving av merd
- Tømming av merd fra bunnen
- Vannforsyningssystem



Figur 6: Illustrasjon fra søknad om utviklingstillatelse

Basert på prosjektgruppas erfaring med utvikling av blant annet offshorerigger ble det ikke søkt om utviklingstillatelse basert på en detaljert beskrevet teknologi, men derimot søkt om et utviklingsløp som skulle ta utgangspunkt i et konsept. Gjennom utvikling av fire generasjoner skulle dette videreutvikles til en kommersiell merd. For å styre utviklingen ble det definert klare delmål og suksesskriterier (se kapittel 2.6).

Mellom hver av merdgenerasjonene ble resultater fra bygging og drift av foregående generasjoner evaluert og benyttet til å utvikle neste generasjon. I tillegg til å sette av tid til å evaluere erfaringene fra foregående generasjoner måtte evalueringene baseres på kvalitativ og kvantitativ informasjon om merdens tekniske - og minst like viktig - biologiske prestasjoner. Søknaden beskrev derfor et biologiprogram som skulle gjennomføres for hver av generasjonene. Biologiprogrammene er dekket i kapittel 4.

At søknaden beskrev et utviklingsløp og ikke en endelig teknisk løsning ga prosjektet tilstrekkelig frihet til å utvikle teknologien i tråd med læring fra foregående generasjoner. Dette fremstår i ettertid som kanskje den viktigste enkeltstående suksessfaktoren for prosjektet.

I prinsippet deler første generasjon av merden mye med siste generasjon, men den fjerde generasjonen er forbedret på en rekke områder som i sum gjør den til en langt bedre produksjonseenhet. I det følgende gis en overordnet gjennomgang av designprosessen fra første til fjerde generasjon.

3.2.1 Utvikling og fabrikasjon av generasjon 1 til 4



Figur 7: *Aquatrax 1* på lokalitet i Eiterfjorden.
Foto: Steinar Johansen

Allerede flere måneder før endelig tilsagn om tildeling av tillatelser ble arbeidet med den første generasjonen igangsatt. Et tverrfaglig team ble satt sammen, dokumenthåndteringssystem og samhandlingsverktøy utviklet og kickoff-møte ble avholdt.

Design og prosjektering

Før designarbeidet kunne igangsettes ble DNV engasjert, og i samarbeid med MNH og SFS ble regelverkskrav enheten skulle tilfredsstille definert i en designbasis. Parallelt med dette ble bølgehøyder, strøm og vind det skulle designes for bestemt. Funksjonskrav ble også definert og samlet i en

funksjonsspesifikasjon. Først da disse grunnforutsetningene var på plass ble videre utvikling av konseptet igangsatt.

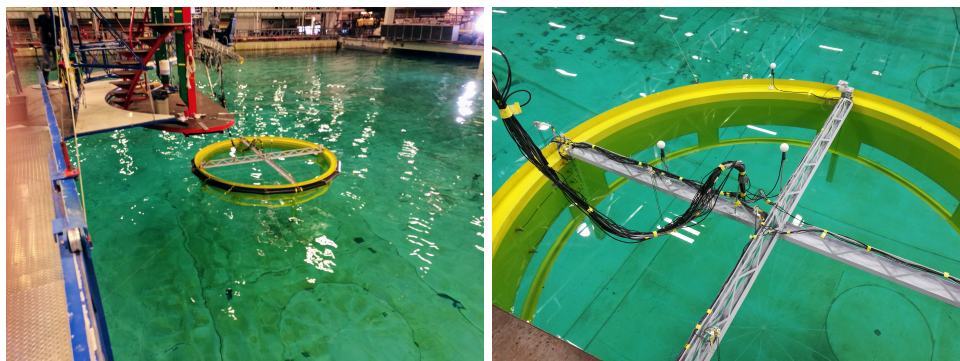
Figur 7 viser *Aquatrax 1* ferdig installert på lokalitet i Eiterfjorden.

Utviklingssteg og løsninger fra konsept til 1. generasjon *Aquatrax* kan oppsummeres som følger:

1. Konseptutvikling hvor designteamet jobbet tett med oppdretter i en iterativ prosess hvor overslagsberegninger og høynivå-vurderinger gjennomføres inntil konseptet svarer på alle hovedoppgavene. Dette være seg oppdrettsvolum, regelverkskrav, kostnader, vannforsyning osv. Så snart dette var på plass ble konseptdesignet låst.
2. Etter at hovedparametrene var låst ble designet testet i havbassenget for å avklare om beregninger og antagelser var korrekte. Resultatene fra testene ble videre benyttet til å kalibrere beregningsmodellene. Bassengtester avdekker også svakheter som ikke er vurdert eller som det er vanskelig å beregne. Testene ga derfor også en økt trygghet for at det ikke ville oppstå uforutsette hendelser i fullskala.

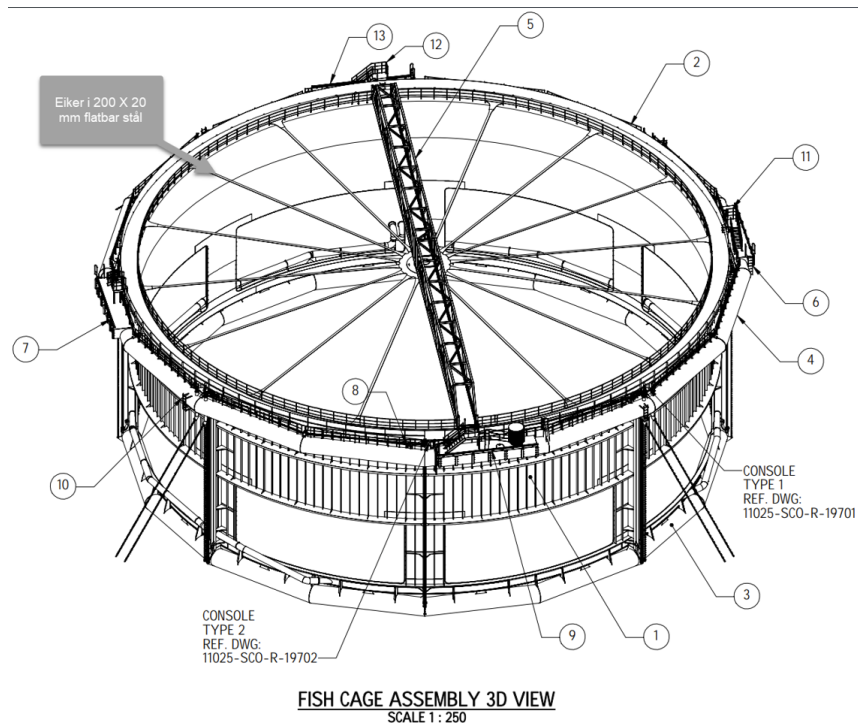
I stive og tette merdsystemer kan effekten av sloshing skape store problemer. Denne effekten er på samme måte som for en pendel et egensvingefenomen. En pendel svinger frem og tilbake med en gitt frekvens, og på samme måter vil bølger inne i en lukket merd bevege seg frem og tilbake i merden med en gitt frekvens. Om pendelen dyttes hver gang den er i ferd med å skifte retning vil pendelutslagene øke. For bølger vil det samme oppstå om bølgen «dyttes» som følge av bevegelser i stålstrukturen hver gang den er i ferd med å snu. Bølgehøyden vil da øke for hver gang. I åpne

merder er nødvendigvis ikke dette et problem da bølger inne i merden vil bevege seg ut av systemet. For en semilukket løsning som Aquatraz var det derimot viktig å avklare om fenomenet kunne oppstå ved de bølgeperiodene merden skulle operere i. Bassengtestene dekket derfor et bredt spekter av bølgehøyder og bølgeperioder og kombinasjoner av disse. I tillegg ble det også prøvd ut et spesialdesign med tett fleksibel bunn for å avklare om dette ga redusert sloshing. Resultatene fra bassengtestene sammenfalt godt med analysene som var gjort i forkant, og ga ikke grunnlag for å endre konseptdesignet. Bilder fra bassengtest av generasjon 1 hos Sintef Ocean er vist i figur 8.



Figur 8: Test av Aquatraz G1 i Sintef Oceans havbasseng

3. Etter kalibrering av lastmodeller ble detaljanalyser av strukturkapasitet igangsatt. Disse ga forventede resultater for den strukturelle kapasiteten. Utmattingsberegninger med levetid på 20 år ble nå gjennomført. På tross av generelt lave spenningsnivåer viste disse at strukturen ville være utsatt for utmattingsproblemer da spenningene i stor grad skyldes dynamiske laster. Dette i motsetning til eksempelvis skip hvor en betydelig del av lasten er statisk og dermed ikke bidrar til utmatting. For å redusere spenningene ble det implementert 16 stag fordelt rundt merden som var festet til gangbane og til hverandre i senter av merd, som vist i figur 9. Stagene fungerer som eiker på et sykkelhjul og gir en lett og robust løsning. Stagene ville i alle driftsfaser i stor grad bare oppleve strekkspenninger, noe som muliggjorde å benytte strekkstag besående av flattstål som ble sveist inn i felles boss i senter og sveist mot gangbane i ytterkant.

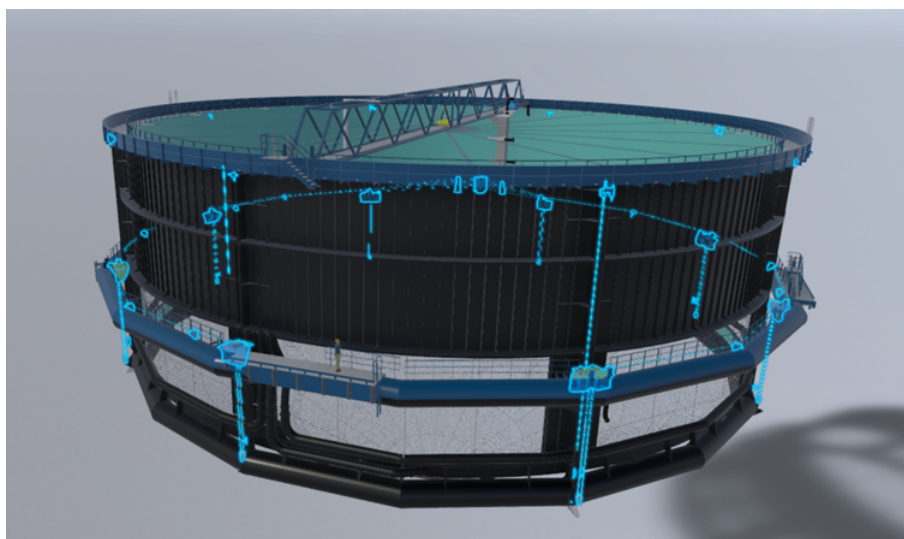


Figur 9: Aquatraz G1 - 3D-visning med eiker for reduserte strukturelle spenninger

4. Design av løftesystem og vanntilførselssystem ble gjort i parallell med detaljprosjekteringen av merden. For løftesystemet ble følgende opsjoner vurdert:

- (a) Ulike hydrauliske jekker
- (b) Hydrauliske kjettingvinsjer
- (c) Wire-vinsj med spoling av flere løftewire på samme trommel

Alternativ c. ble valgt da det ville gi et robust system som blant annet ville håndtere flytekragens defleksjoner under løftet, samt være enkelt å operere.



Figur 10: Aquatraz G1 modellert i 3D-modelleringsverktøyet Catia

5. Komplette merd inkludert løftesystem og vannforsyningssystem ble modellert av SFS i 3D-programvaren Catia (se figur 10). Fra modellen ekstraherte Focus Engineering 2D-tegninger.

Som følge av godt samsvar mellom beregninger og modelltest samt grundige designgjennomganger med røktere, ledelse og designteam, var det stor tillit til at Aquatraz ville prestere som planlagt i prosjektteamet og i ledelsen. Det ble derfor valgt at neste trinn ville være å bygge fire tilsvarende merder med Midt-Norsk Havbruk som bestiller.

Fabrikasjon

Flere verft både nasjonalt og internasjonalt ble vurdert, og etter en samlet vurdering ble kontrakt på 4 merder satt til Fosen Yard i Rissa kommune. Figur 11 til 16 viser deler av fabrikasjonsprosessen under bygging av *Aquatraz 1*.

Verftet fabrikerte hver merd i 8 seksjoner i sveishallen.



Figur 11: Fabrikasjon av moduler



Figur 12: Transport av moduler



Figur 13: Maling i hall

Etter fabrikasjon av modulene ble disse flyttet til malingshallen. I den tempererte malingshallen ble både skrogmoduler og andre mindre deler av merden overflatebehandlet.

Etter overflatebehandling ble modulene satt sammen i dokken slik at de dannet en halv merd.

Om dokken hadde vært tilstrekkelig bred ville hele merden blitt montert sammen her, men dette ville kreve en dokk med bredde på minimum ca. 55 meter.

Dokken på Rissa er ca. 40 meter og halvdelene måtte derfor flytes ut av dokka før de to halvmerdene ble sveist sammen over vannlinjen.



Figur 14: Oppstilling av merdmoduler

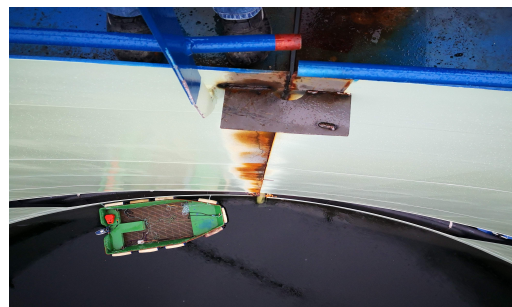


Figur 15: Fylling av dokk og forflytning av merdmoduler



De to halvdelene ble sammenstilt ved kai og de øvre delene som var over vannlinjen sveist sammen. Figur 16 viser den smale vertikale sveisesømmen som dokumenterer god toleransekontroll under fabrikasjonen av de to halvdelene.

For å sveise de nedre delene av merden måtte den heves ut av vannet og merdens vekt var for høy til at verftets kraner kunne benyttes. Det ble derfor designet og bygget to skreddersydde nedsenkbare lektere som kunne flytes inn under merden for så å løfte den ut av vann ved å tømme lekternes ballasttanker (figur 17).



Figur 16: Flytende sammenstilling



Figur 17: Lekterne *Akva* og *Traz* i dokk og *Aquatrax 1* løftet på lekterne

Etter sammensveising ble løftesystemet montert, bro løftet på og strømsettere installert. Da merden var ferdigstilt ved kai ble den slept ut for sjøprøve, vist i figur 18. De samme lekterne ble for merd nr. 2, 3 og 4 benyttet til å transportere merdene fra verft til lokalitet, og ved senere flytting av merdene over større avstander.

Sjøprøvene dekket blant annet heving og senking av merden, testkjøring av strømsettere og toleransekontroll (figur 18). Etter godkjent sjøprøve ble *Aquatrax 1* overlevert og fraktet til lokaliteten Eiterfjorden på en Boa barge (figur 19).

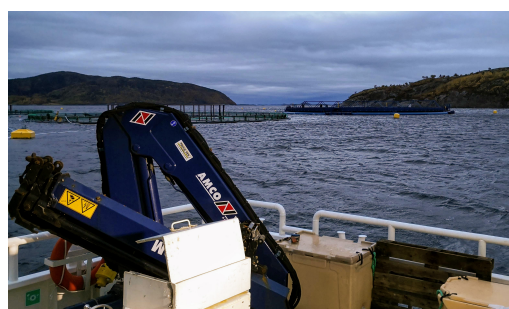


Figur 18: Sjøprøve av *Aquatrax 1*

Etter ankomst ble merden sjøsatt, slept inn i rammefortøyningen og fortøyd (figur 20).

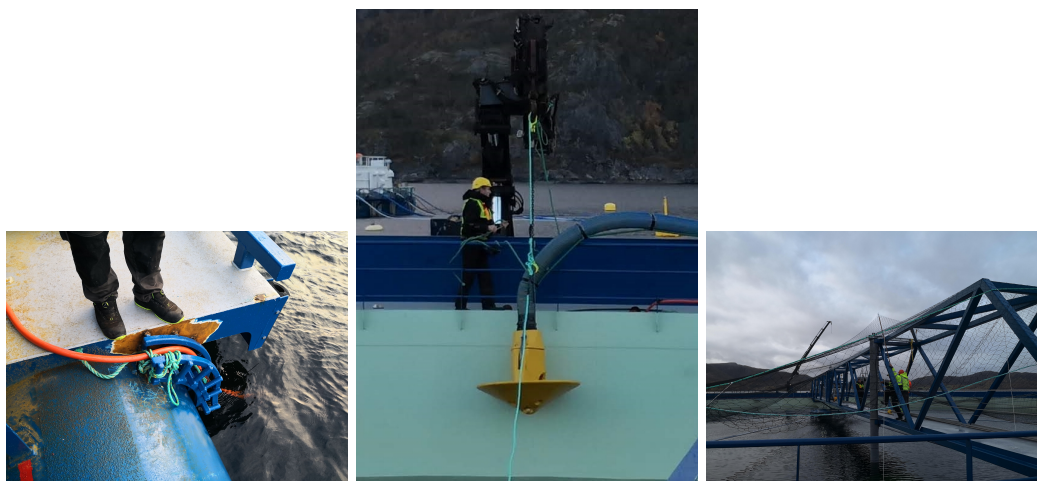


Figur 19: Transport av *Aquatrax 1* fra verft til lokalitet



Figur 20: *Aquatrax 1* ferdig fortøyd på lokalitet

Merden ble før utsett av fisk koblet til strøm fra forflåte og testet i henholdt til godkjent testprogram. Systemer for føring og dødfiskhåndtering ble montert, fuglenett ble også installert (figur 21).



Figur 21: Utstyr på merd ferdig montert på lokalitet - kraftkabelinntak (venstre), liftup for dødfiskopptak (midten) og fuglenett (høyre)

I henhold til plan skulle det bygges totalt fire tilsvarende merder av 1. generasjon, og fabrikasjon av merd nr. 2 ble igangsatt umiddelbart etter at panelproduksjonen til den første merden var ferdigstilt.

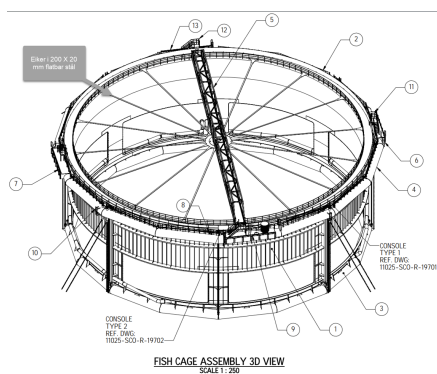
Erfaring fra design og bygging av den første merden samt kritiske innspill fra driftsorganisasjonen knyttet til at eikene kunne være i veien under drift, medførte at beslutningen om å bygge fire like merder ble endret. I stedet ble merd nr. 1 og 2 ferdigstilt i henhold til plan, mens prosjektering av G2 ble gjennomført parallelt med fabrikasjon av merd nr. 1 og 2 og etterhvert drift av merd nr 1.

Design og byggeprosessen for de gjenstående merdene fulgte i hovedsak de samme fasene som er beskrevet over. Derimot fulgte videreutviklingen av de gjenstående generasjonene et annet løp da både generasjon nr. 3 og nr. 4 er ombygninger av tidligere generasjoner. I det følgende vil bakgrunnen for dette beskrives samtidig som det gis en kort innføring i hvordan endringsprosessene ble håndtert.

3.3 Læringspunkter og designendringer

Det vil bli for omfattende å beskrive alle funn, korrigeringer og løsninger som har fremkommet under gjennomføring av prosjektet. I dette kapittelet gis i stedet en punktvis fremstilling av vesentlige læringspunkter fra fabrikasjon og drift av merdene, samt aksjonene/designendringene som ble tatt på bakgrunn av disse. Endringene er beholdt for alle senere generasjoner dersom ikke annet står beskrevet.

3.3.1 Endringer etter funn under prosjektering og fabrikasjon



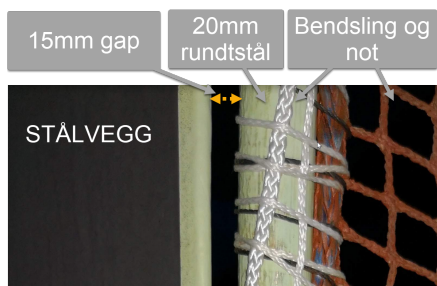
G1 - Kompliserte ståldetaljer mht. fabrikasjonsvennlighet.

⇒ G2 ble betydelig enklere å fabrikere som følge av færre kompliserte detaljer, færre tykke plater og bortfall av eiker.



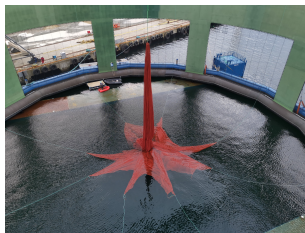
G1 - Løftesystem er komplisert å installere på verft, kostbart i anskaffelse og består av mange komponenter som potensielt kan være utfordrende mht. vedlikeholdsomfang. I tillegg krever systemet hydraulikk fra eksternt fartøy.

⇒ G2 fikk nytt løftesystem med Dyneema tau og fire synkroniserte elektriske vinsjer. Ved bruk av elektriske vinsjer kan merdene heves og senkes med kraft fra flåte eller merden.



G1 - Vanskelig å feste inn nøter, trangt å sy med bendslingsnål.

⇒ G2 økte avstanden til 30 mm mellom rundstål og merdvegg slik at bendslingsnål kunne benyttes



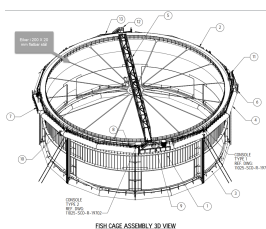
G1 - Not har betydelig kortere levetid enn merden

⇒ G2 har beholdt Dynema not i bunn, mens sidevinduene er byttet til Kikkonet som har lengre levetid.



Transport av merd nr.1 fra verft til lokalitet måtte gjøres med innleid lekter da det tok for lang tid å få på plass de nødvendige godkjenningene. Dette medførte at prosjektet måtte finne egnede lektere i leiemarkedet og tilpasse seg valgte lekters seilingsplan. I tillegg krever merdens dimensjoner en forholdsvis stor og kostbar lekter.

⇒ DNV godkjenning for at merd 1 ,2, 3 og 4 kan transporteres på de nedsenkbare lekterne *Akva* og *Traz* i sjøtilstand 1,5 meter Hs.



G1 - Eikene er kompliserte å beregne mht. fatigue, de krever betydelig arbeid under installasjon og de viste seg ofte å være i veien under arbeid på merden.

⇒ G2 – Eikene fjernes og gangbanens bredde økes fra 1,5 meter til 3 meter for å kompensere for tapt strukturell styrke.

Etter hvert som flere av merdene kom i drift ble en økende del av læringen og forbedringsområdene knyttet til fiskehelse, biologiske prestasjoner og driftsoperasjoner. I neste kapittel beskrives de viktigste biologiske funnene som har medført tekniske endringer på merdene.

3.3.2 Endringer etter biologiske funn

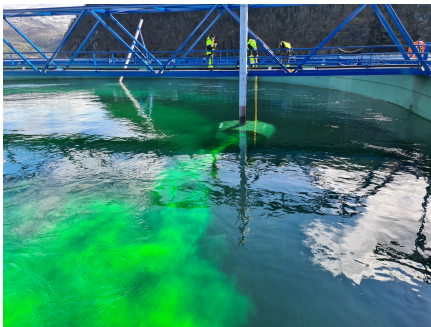
Ved produksjon på Kyrøyan var lusepresset i Aquatraz med 8 meter skjørt betydelig lavere, men ikke tilstrekkelig til å unngå behov for avlusninger.



Behov for avlusning i noen av produksjonene

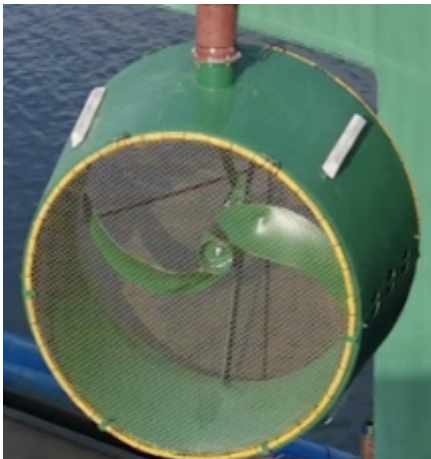
- ⇒ G3 - dybde på luseskjørtet økes fra 8 meter til 18 meter ved å sette inn presenning i de åpne vinduene.
- ⇒ G2 - Et mindre luseskjørt med dybde 5 meter for beskyttelse ned til totalt 13 meters dybde ble etterinstallert for å høste data og kunnskap om optimal skjørtedybde.

Aquatraz har ikke tilsvarende døgnvariasjoner for oksygen som konvensjonelle merder og det er også en mindre eller ingen tydelig korrelasjon mellom oksygennivå og biomasse. Derimot er det, i likhet med konvensjonelle merder, på høsten at de laveste verdiene inntreffer. I snitt har oksygenverdiene i Aquatraz vært lavere enn for referansemerdene.



Lavere gjennomsnittlige oksygenverdier i Aquatraz sammenlignet med referansemerder

- ⇒ G1 – ejektorstrømsetter byttes ut med propellstrømsetter. Det installeres videre 2 ekstra strømsettere på bro.
- ⇒ G2 – Det monteres i likhet med merd nr. 2 til sammen fire propellstrømsettere, men disse distribueres rundt merden med 90 graders mellomrom.
- ⇒ De tre første generasjonene er ved avslutning av prosjektet utrustet med 4 strømsettere og for merd 3 og 4 er effekten for hver strømsetter økt fra ca. 4 til 5,5 kW. I tillegg ble strømsetterne fra og med G2 utrustet med profilerte propelldyser som øker virkningsgraden betraktelig.



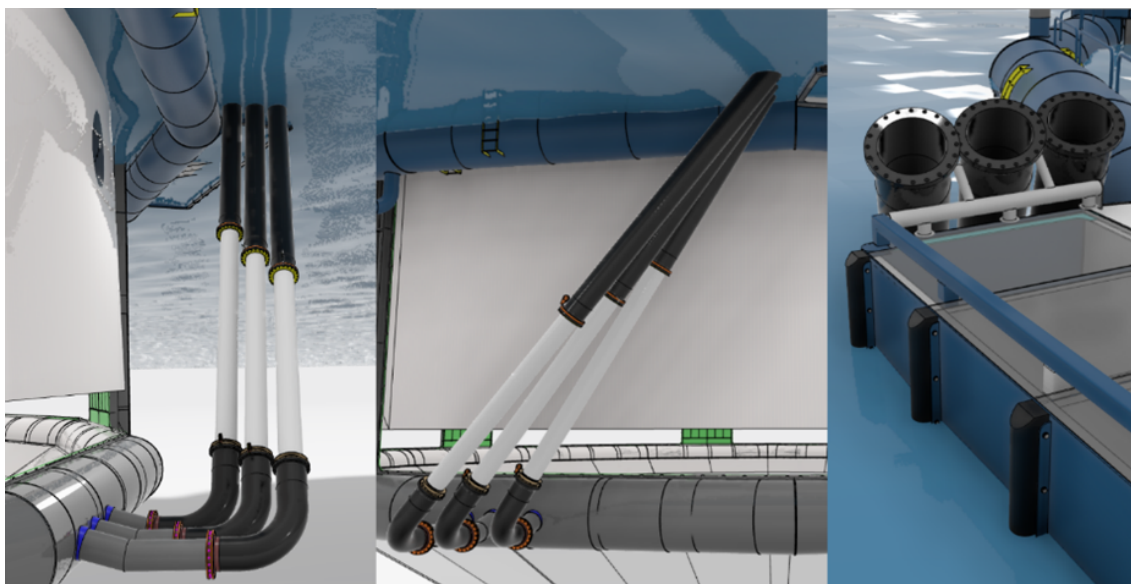
I generasjon 4 er det implementert et alternativt vannforsyningssystem som kan jobbe sammen med strømsettere eller uavhengig av strømsettere. Grunnet pågående patenteringsprosess kan ikke dette systemet beskrives ytterligere.

3.3.3 HMS/Driftserfaringer som har påvirket designet

G1 - HMS-utfordringer knyttet til å koble losseslanger mot brønnbåt



⇒ G2 – Nytt tømmesystem hvor fleksible slanger byttes ut med en teleskopløsning som gjør oppkoblingen langt enklere og koblingspunktet mellom brønnbåtens slanger og teleskopet holdes i samme posisjon uavhengig av om merden heves eller senkes. Dette forenkler administrasjon av slanger under lasteoperasjonen og reduserer risiko for ulykker og skader på personell/utstyr. Nytt tømmesystem er illustrert i figur 22.



Figur 22: Aquatraz G2 - Nytt tømmesystem

- Behov for bemannet løft for å observere fisk under levering direkte fra topp av merd
⇒ G2 - Løftesystemet oppgraderes til personløft.
- G1, G2 og G3 - Inn- og utløpsbeskyttelsen på strømsetterne klogges til og er utsatt for skader.
⇒ Ulike løsninger er implementert for å sikre at dødfisk og objekter i vannmassene ikke blir liggende på innløpsnett, samt for å øke robustheten slik at skader ikke oppstår, se figur 23.



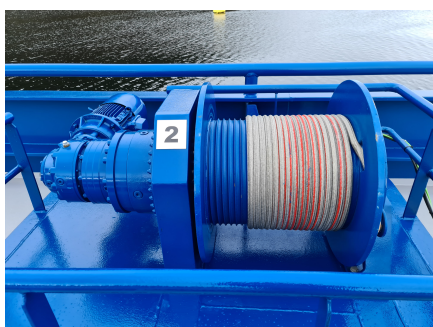
Figur 23: Innløpsbeskyttelse på strømsettere. Fra venstre: Plan innsugsbeskyttelse - Konisk innløp og messing innsugsbeskyttelse - Konisk innløp og strikkinnspent not - Plan innsugsbeskyttelse med stålgitter

- G1 - Sjøsprut ved sterk vind gir overflatevann på gangbane og inn i merd. Dette er ugunstig mht. arbeidsforhold og kan medføre at lus kommer inn i merden
 - ⇒ G2 – Gangbane og flytekrage endres slik at sjøsprut så å si elimineres
- G1 - Malingssystemet har fungert godt, men behov for ytterligere sklisikring
 - ⇒ G1 merd 2 og G2 utrustet med bedre sklisikring over større arealer



G1 og G2 - Merdene har små bevegelser i sjøgang, men det observeres løft mellom flytekrage og gangbane, noe som skaper slag mellom flytekrage og gangbane.

⇒ G1 og G2 – strekkfisker og låsinger ettermonteres for å hindre løft.



G2 - Kabelføringer til vinsjene fra hovedtavle på merd og ned til vinsjene, som for denne generasjonen er montert på flytekragen, ble vanskelig å håndtere under drift da det måtte gis ut kabel under løft og tilsvarende trekkes inn under senking av merden.

⇒ G3 – Vinsjene flyttes opp på gangbanen slik at kabelføring er upåvirket under løfting av merden.

- Løftesystemet for Aquatrax G2 og G3 var utsatt for mange alarmer som medførte stopp under heveoperasjonen.
 - ⇒ Det er for G3 og G4 montert ekstra gir slik at momentet på motoren reduseres.

⇒ G2 er planlagt bygget om til hydrauliske motorer da vinsjene på denne merden er montert på flytekragen og dermed godt egnet for tilkobling av hydraulikk fra fartøy.



G2 - Fristilling av bro gir slitasjeskader i glidesonen mellom syrefaste plater.

⇒ G3 og G4 utrustes med glideføringer i teflon mellom bro og merdstruktur

- Bunnstoff på utsiden av merden har fungert utmerket, men for G1 ble det valgt å benytte konvensjonelt malingsystem på innsiden av merden. Dette har medført betydelige begroing og behov for regelmessig vasking.

⇒ G2 har Seaforce 90 bunnstoff også på innsiden av merden.

- G1 - Ved mottak av fisk oppstår kollisjon mellom brønnbåtens leveringsrør som følge av at rørene ikke har tilstrekkelig høyde. Lengden på rørene er også i korteste laget når brønnbåten legger til ved kai.

⇒ Alle merder er nå utrustet med porter og åpninger i rekkverket inn mot merden for å gi tilstrekkelig høyde til leveringsslanger. For G2 og G3 som har bredere gangbaner ble det tilrettelagt for at brønnbåt kan ligge inn mot merdene i stedet for mot kai. Dette for å redusere distansen fra skipsside til innsiden av merdene slik at brønnbåten kunne losse på tradisjonelt vis.

- Heving av håv for prøvetaking og transport av utstyr fra merdenes kaier til gangbane må gjøres med eksternt fartøy, noe som krever fartøy med kran på lokalitet. Slike løft bør også unngås mht. risiko for skader på personell og utstyr.

⇒ G3 ble ved levering utrustet med løfterail for løft fra kai til gangbane og videre inn/ut fra merd.



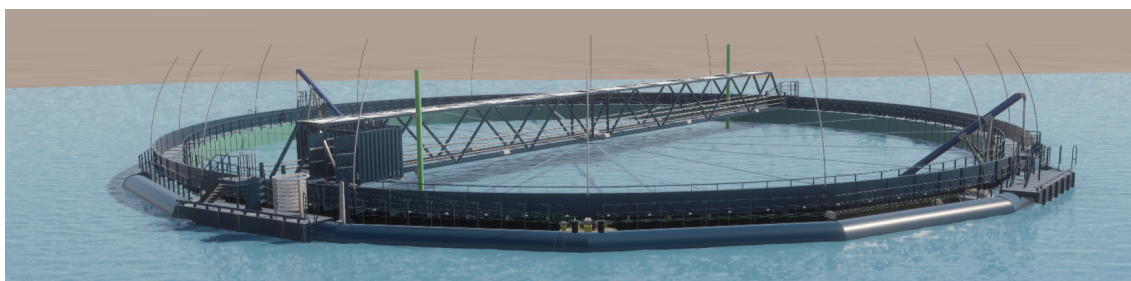
Kabelavhenging på G1 var del av merdens struktur og kunne ikke flyttes. Dette var uheldig i drift da kabelinntaket måtte tilpasses lokale forhold.

⇒ Flyttbar kabelavhenging basert på jekkestropper rundt flytekragen som kan benyttes på alle generasjoner av merden og fire kabelgjennomføringer med kabelavhenging for videreføring av kabel inn på gangbane inkludert i designet (figur24).



Figur 24: Flyttbar kabelavhenging og kabelgjennomføringer

- Fuglenett på alle generasjoner var tilpasset beskyttelse av den indre vannflaten. Mot slutten av prosjektet er det benyttet flytefor, noe som medfører mer fugl på merdene og økt behov for rengjøring
 ⇒ Alle merdene bygges om til fuglenett som dekker hele merden inkludert gangbanene (figur 25).



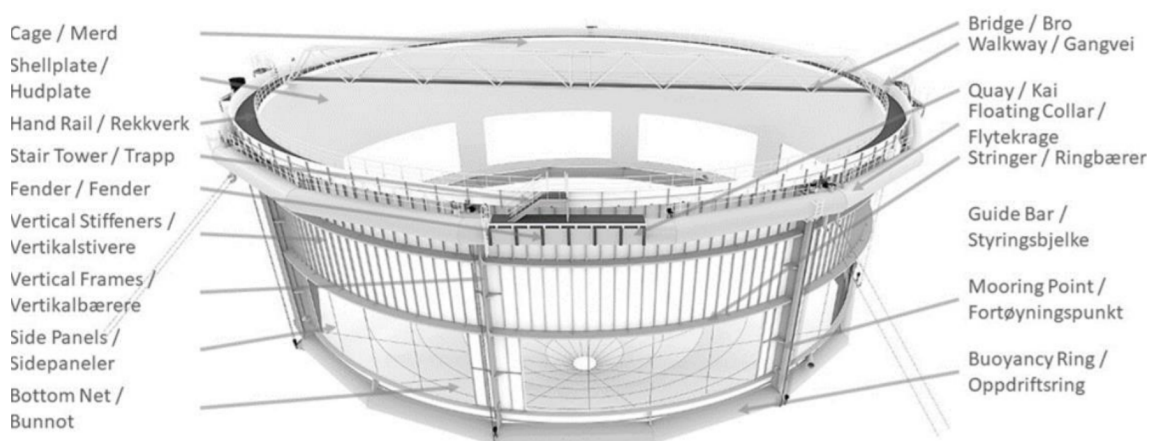
Figur 25: Fuglenett som dekker hele merden

3.4 Egenskaper Aquatraz

I dette kapitlet vil hovedparametere og egenskaper som er vesentlige for sikker og effektiv produksjon i Aquatraz belyses.

3.4.1 Navngiving av Aquatraz komponenter

Navngiving av komponenter som inngår i Aquatraz er vist i figur 26.



Figur 26: Navngiving Aquatraz komponenter

3.4.2 Hovedparametere

Merdenes ID-plater oppgir de vesentligste parameterene og er montert lett synlig på alle merdene. ID-platene til *Aquatraz 1* og *Aquatraz 4* er vist i figur 27.

Merdenes egenvekt er for alle generasjoner ca. 10 kg/m³ oppdrettsvolum.

 Safeguarding your fish	
Produktnummer	AQT G01 - FLYTEKRAGE
ID-Nummer	AQT-G01-C0002
Ordrenummer/Prosjektnummer	10002
Dokumentnummer ID Plate	AQT-SFS-Z-VB-0221
Normativt krav	NYTEK- forskriften
Sertifiseringsstandard	NS 9415 : 2009
Sertifiseringsorgan	DNV GL Business Assurance Norway AS
Omkrets bur	160 m
Dybde skjørt	8 m
Dybde bunterne	18 m
Største dypgående struktur	20 m i nedre stilling, 2 meter i øvre stilling
Største dypgående bunnnot	32 m med bunn og bur i nedre stilling, 16 m med bur hevet og not i nedre stilling
Største høyde	21,2 m i øvre stilling, 4,6 m i nedre stilling
Oppdrettsvolum	44000 m ³
Maksimal last hvert forøyningspunkt	ULS 32 t (± 45° horisontalt, 0° til 30° vertikalt)
Maksimal last hver kai	1500 kg / m ² - 6 000 kg totalt
Maksimal last ytre gangbane	1500 kg / m ² - 10 000 kg totalt
Maksimal last bro	400 kg / m ² - 2 000 kg totalt
Arbeidstrykk vinsj	130 bar
Elektrisk kraftforsyning	Trefase 400V med 100A vern
Miljølast	Nedsenket Under løft Hevet Ved slep *
HS [m]	1,7 0,75 1 1
TP [s]	4,0 - 6,8 2,6 - 4,0 2,7 - 4,0 2,6 - 4,0
Strøm [m/s]	1 1 1,5 3 **
Vind [m/s]	40 13 20 15
* Forutsetter at merd er hevet og sikret ** Slepehastighet i knop	
Produksjonsdato	27.03.2019
Designlevetid	20 år
Bygget ved	Fosen Yards AS
Produsent	Aquatraz AS, Løkkeveien 75, 4008 Stavanger
Kontakt	post@aquatraz.no

 Safeguarding your fish	
Produktnummer	AQT G03 - FLYTEKRAGE
ID-Nummer	AQT-G03-C0001
Ordrenummer/Prosjektnummer	10004
Dokumentnummer ID Plate	AG3-0001-SFS-Z-VB-0096
Normativt krav	NYTEK- forskriften
Sertifiseringsstandard	NS 9415 : 2009
Sertifiseringsorgan	DNV GL Business Assurance Norway AS
Omkrets bur	160 m
Dybde skjørt	8 m stålskjørt, 18 m presenning
Dybde bunterne	23,5 m
Største dypgående struktur	21,5 m i nedre stilling, 2,25 m i øvre stilling
Største dypgående bunnnot	35 m med bunn og bur i nedre stilling, 17 m med bur hevet og not i nedre stilling
Største høyde	21,2 m i øvre stilling, 4,6 m i nedre stilling
Oppdrettsvolum	52 000 m ³
Tillatt antall personer på bur under løft	5
Maksimal last hvert forøyningspunkt	ULS 59 t (± 45° horisontalt, 0° til 30° vertikalt)
Maksimal last hver kai	500 kg / m ² - 6 000 kg totalt
Maksimal last ytre gangbane	1500 kg / m ² - 10 000 kg totalt
Maksimal last bro	400 kg / m ² - 2 000 kg totalt
Elektrisk kraftforsyning	3x400V 50Hz, 100A effektbryter
Miljølast	Nedsenket Under løft Hevet Ved slep *
HS [m] uten presenning i side og bunn	2,1 0,75 1,8 1
HS [m] med presenning i side og bunn	1,5 0,75 1,5 1
TP [s] uten presenning i side og bunn	4,4 - 7,5 2,6 - 4,0 4,1 - 7,0 2,6 - 4,0
TP [s] med presenning i side og bunn	3,2 - 4,5 2,6 - 4,0 3,2 - 4,5 2,6 - 4,0
Strøm [m/s] Med og uten presenning	1 1 0,89 3 **
Vind [m/s] med og uten presenning	40 13 31 15
* Forutsetter at merd er hevet og sikret ** Slepehastighet i knop	
Produksjonsdato	24.04.2020
Designlevetid	20 år
Bygget ved	Fosen Yards AS
Produsent	Seafarming Systems, Camilla Collets gt. 6, 4020 Stavanger
Kontakt	post@seafarmingsystems.com

Figur 27: ID-plate G01-C01 (*Aquatraz 1*) og G03-C01 (*Aquatraz 4*)

3.4.3 Vannutskiftning

Vanngjennomstrømningen i Aquatraz kan ikke måles direkte, og er ved hjelp av flere beregningsmetoder estimert til å være ca. 40 m³/s. Vanngjennomstrømningen er en svært viktig parameter for gjennomstrømningsanlegg, og det vil i det følgende beskrives hvordan den er beregnet, hvilke utfordringer prosjektet har møtt og litt om veien videre.

Bakgrunnen for at vanngjennomstrømningen ikke kan måles eksakt er at Aquatraz tar inn vann over et stort areal hvor vannstrømhastigheten varierer til enhver tid. Eksakt beregning vil derfor kreve målinger over hele arealet samtidig, noe som vanskelig lar seg gjøre. Metodene for å beregne vanngjennomstrømningen er derfor basert på CFD-analyser av merden og følgende fullskalametoder:

- Målinger av oksygendifferanse mellom inn- og utløpsvann sammenholdt mot biomasens beregnede oksygenforbruk. Vanngjennomstrømningen er i dette ligningssettet den ene ukjente og kan dermed beregnes.
- CFD-analyser hvor merdens geometri, strømsettere og sjøvannet både i og utenfor merden modelleres med riktig strømhastighet og tetthet.
- Hastighetsmålinger inne i merdene ved hjelp av vektormålere som måler hastighet i

alle retninger og rotormålere som gir hastighet i ett plan.

- Fargeforsøk hvor fargestoff blir tilsatt vannet og distansen fargestoffet beveger seg over en kjent distanse benyttet til å bestemme hastighet og retning. I de fleste av disse forsøkene er det benyttet fløte som fargestoff siden fløten har lav spredningshastighet i vannet og dermed holder seg mer samlet i vannmassene, noe som er særlig viktig ved målinger av hastighet.
- Visuelle observasjoner fra merdkant, drone, konvensjonelle undervannskamera og 360 °-kamera. Ved filming under vann gir partikler i vannet som feces og annet en god forståelse av hvordan vannet strømmer, men metoden er ikke benyttet direkte til å beregne vannstrøm.

Resultatene fra disse målingene viser tydelige døgnvariasjoner i vanngjennomstrømningen og følgende elementer er dokumentert å påvirke resultatene:

- Ekstern strøm
- Tetthetsforskjeller på innstrømmende vann både over tid og over vannsøylen fra overflate og ned til ca. 25 meter.
- Biomassen
- Vind

Flere av disse faktorene følger ingen kjent syklus, og de er vanskelige å registrere i sanntid. Dette medfører at det er utfordrende å kartlegge graden av påvirkning hver komponent bidrar med og samvirke mellom dem. Det gjenstår derfor en betydelig mengde med arbeid både med hensyn til målemetodikk og systemforståelse. En bedre forståelse av vandynamikken vil være vesentlig for å optimalisere merden og slik kunne redusere energiforbruk samt øke vanngjennomstrømningen ytterligere.

I de siste generasjonene av merden har energiforbruket vært under 0,1 kWh pr. produsert kilo biomasse. Sammenlignet med andre konsepter med aktiv vannutskiftning er dette lavt. Typiske tall fra semilukkede merder med konvensjonelle pumpesystemer er gjerne 10 ganger høyere. Lukkede flytende RAS-anlegg antas å ligge ca. 50 ganger høyere, og landbaserte anlegg bruker 50 til 100 ganger mer energi.

Ved å sammenholde resultatene fra de ulike målemetodene for vanngjennomstrømning er vanntilførselen inn i merden mellom 30 til 50 m³/s. Oppdrettsvolumet på generasjon 3 er eksempelvis 52 000m³, og av dette volumet er det bare den øvre delen over 18 meter hvor vannet byttes ut gjennom aktiv vannutskiftning. Legges dette volumet til grunn byttes vannet ut fra hvert 12. til 20. minutt, noe som burde gi bedre oksygenverdier i merden enn hva som er registrert. Dette misforholdet skyldes at en del av vannet som forlater merden tas inn igjen (resirkulering), særlig merkbart ved strømstille.

Den patenterte vanntilførselsløsningen som er benyttet på de tre første generasjonene gir høy vannutskiftning med lavt energiforbruk. Løsningen baseres på at vannet i merden settes i rotasjon ved bruk av strømsettere, noe som skaper et undertrykk i midten og et overtrykk langs sidene. Disse trykkforskjellene medfører at vann under merdens senter løftes opp, mens vann langs sidene av merden presses ned, ut og bort fra merden. Videre optimalisering

av systemet vil rettes mot å redusere graden av resirkulering. Det er også en målsetning i fortsettelsen å nyttiggjøre seg eksterne faktorer som kan påvirker vannutskiftningen positivt. Foreløpige resultater gir grunnlag for å tro at merden på sikt vil kunne «puste» uten behov for ekstern krafttilførsel, og endatil kanskje produsere energi.

3.4.4 Vask, desinfisering og vedlikehold

Vask, desinfisering, inspeksjoner og vedlikehold av merden utføres for skrogsidene når merden er i hevet posisjon. For utvendig vasking har Midt-Norsk Havbruk tatt i bruk en ny spylerigg som forenkler arbeidet. Riggen er vist i figur 28.

Gjennom prosjektet har løfteprinsippet blitt beholdt i alle generasjoner da det har fungert svært godt. Det har vært ulike utfordringer med systemet, men disse har vært på komponentnivå og anses nå som løst.

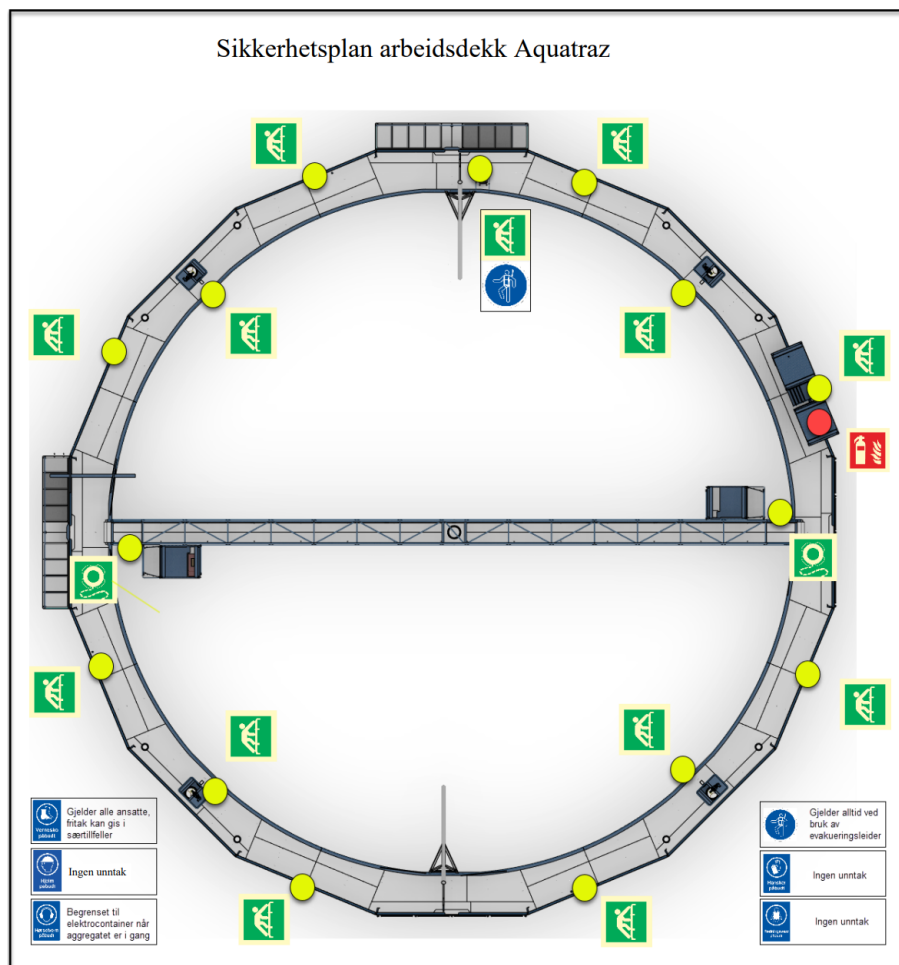


Figur 28: Spylerigg

Løftesystemet bidrar også til at merden kan tas ut og inn av rammefortøyninger i hevet tilstand og dermed håndteres på tilsvarende måte som konvensjonelle merder. I hevet tilstand har merden et dypgående på ca 2,5 meter. Den reduserte dypgangen har også muliggjort bruk av enkle nedsenkbare lektere som benyttes til å løfte merden helt ut av vannet eller for transport over lengre distanser i sjøtilstand opp til 1,5m Hs.

3.4.5 Arbeidsmiljø og drift

Den stive strukturen og små bevegelser som følge av bølger og vind legger til rette for et trygge og gode arbeidsforhold ombord på merden. Langs alle gangveier er det rekkverk på begge sider og merden er utrustet med livbøyer, nødledere og brannslukningsapparater. Figur 29 viser sikkerhetsplan for arbeidsdekket på Aquatraz.



Figur 29: Sikkerhetsplan arbeidsdekk

Til forskjell fra konvensjonelle merder har Aquatraz betydelige lagringsarealer med lastekapasitet på 500 kilo per m². Dette muliggjør mellomagring av relativt tungt utstyr og eksempelvis storsekker. Gangbanene på de siste generasjonene er 3 meter brede, noe som også gir god plass til transport og annet arbeid som eksempelvis prøvetaking.

På *Aquatraz 3* og *4* er det montert lagercontainere som forenkler driften av merdene, og som reduserer behovet for bruk av større fartøyer for transport av utstyr frem og tilbake. På sikt er det en målsetning at merden skal kunne driftes utelukkende med personellbåter uten kran og lastedekk. Ved behov for flere containere kan dette ettermonteres.

3.4.6 Støttesystemer

Alle generasjonene av merden er nå utrustet med elektrocontainere som i tillegg til elektrotavlene inneholder back-up dieselaggregat for strømproduksjon, alarmsentral og kraftelektronikken til strømsettere samt for løftessystem på G2-G4 (figur 30).



Figur 30: Bro, gangbane og containere med blant annet elektroutstyr på *Aquatraz 2*

For å redusere faren for at sjøsprut bringer lus, nauplier (luselarver) og egg inn i anlegget har generasjon 2, 3, og 4 bølge- og sprutfanger rundt hele merden som en integrert del av strukturen. Dette bidrar i tillegg til et bedre arbeidsmiljø i dårlig vær.

Det er både enkelt og sikkert å ankomme Aquatraz med båt da merden er utstyrt med 4 kaier (90 grader mellom hver), se figur 31.

Siden merden er tett og har stor masse dempes bølger effektivt. Minst én av kaiene vil dermed til enhver tid ligge beskyttet for bølger. For å unngå skader på båt og merd er kaifrontene utrustet med gumfifendere. I forkant av kaiene og rundt hele merden ligger fortøyningslister som muliggjør enkel fortøyning uavhengig av fartøyets lengde. Adkomst til selve merden skjer gjennom åpninger i skansekledningen.



Figur 31: Kai og ankomst på *Aquatraz 4*



Figur 32: Aquatraz G2 hanefotinnfesting, pullert, kjettingpipe og koblingsselement mellom merd og flytekrage

Innfesting av fortøyningslinene er tilgjengelig fra selve gangbanen. Inspeksjon for å avdekke om fortøyningene er intakte eller eventuell justering av haneføttene er derfor lett tilgjengelig, og den gode plassen bidrar til økt sikkerhet under fortøyningsarbeidet. Fortøyningspunkt på *Aquatraz 2* er vist i figur 32.

Broen over merden var i første generasjon dimensjonert for å kunne ettermontere broelementer ut til hver av sidene og slik danne to kryssende broer. Driftserfaringer har vist at broen ivaretar mange nyttige funksjoner, men at det er tilstrekkelig med én bro. *Aquatraz 4* i drift med én kryssende bro er vist i figur 33.

Det antas at bruksområdene for broen vil øke med økende grad av automatisering og overvåkning. I prosjektet er broen benyttet til følgende oppgaver/funksjoner:

- Fortøyning og innfesting av flytende og hengende fôrsprede
- Heving og senking av notspiss og liftup vha. midtmontert elektrisk vinsj
- Strømsetterfundament
- Støtte/innfesting av fuglenett
- Avhenging av oksygen- og temperaturmålere
- Kamerainnfesting for både undervannskamera og konvensjonelle oversiktskamera
- Innfesting av strømmålere og annet forsøksrelatert utstyr
- Visuell kontroll på biomassen
- Utplukking av svimere og eventuelle uønskede objekter i vannet
- Transport av materiell og personell
- Utsetting av nøter og annet fiskehåndteringsrelatert utstyr



Figur 33: *Aquatraz 4* på lokalitet

4 Dokumentasjon av fiskehelse, fiskevelferd og produksjon

De biologiske resultatene som oppnås i oppdrett av laks i sjøfasen er påvirket av en rekke faktorer, som for eksempel egenskaper ved fisken selv, miljøforhold og hendelser i settefiskfasen, utsettstidspunkt i sjø relatert til smoltifiseringsstatus, naturgitte betingelser i sjøfasen, førsammensetning og utføring, miljø, håndtering og røktning undervegs i produksjonen, smittsomme sykdommer og produksjonssykdommer. Merdteknologien kan også sette rammer og påvirke faktorer som betyr noe for biologiske resultater, og det ble derfor tidlig besluttet at man i Aquatrazprosjektet skulle definere mål knyttet til helse, velferd og andre biologiske resultater for de individene som tilbringer store deler av sitt liv i en merdteknologi under utvikling.

I dette ligger en erkjennelse av at biologi påvirker viktige bærekraftsindikatorer, velferdsindikatorer og økonomisk resultat for oppdretter i stor grad, og at sviktende biologiske resultater kan gi svært store utslag på slike indikatorer og økonomi.

4.1 Biologiske måleprogram

Hensikten med biologiprogrammene har vært å dokumentere resultater for Aquatrazmerden, se etter forskjeller mot konvensjonell merd, samt ut fra et biologisk ståsted bidra til videreutvikling av hver generasjon av merdkonseptet og det påfølgende biologiprogrammet. Aquatrazprosjektet har vært et utviklingsprosjekt, ikke et forskningsprosjekt, noe som gir både fordeler og ulemper for et slikt dokumentasjonsprogram.

En av fordelene er å kunne hente gode indikasjoner på resultater fra ordinær driftssituasjon raskt og med relativt lite innsats. Dette vil videre legge grunnlag for hurtig læring til utvikling av neste merdgenerasjon. Ulempene er at man ikke har duplikater eller triplikater i oppsettene, er påvirket av driftsmessige valg og at konklusjonene derfor har lavere grad av sikkerhet enn i et forskningsprosjekt.

Nivået på programmene har vært hensiktsmessig for utviklingsløpet, det har vært detaljert nok til at man har hentet resultater relevant for å gi styring på beslutninger rettet mot å nå suksesskriteriene. Samtidig har kompleksiteten ikke vært så stor at det har hemmet tempo i prosjektet.

Biologiske måleprogram ble knyttet til den første Aquatrazmerden av hver merdgenerasjon. For de tre første biologiprogrammene ble en kontrollmerd fulgt opp samtidig med Aquatrazmerden. Det fjerde og siste biologiprogrammet fokuserte hovedsaklig på vannstrøm og vannkvalitet, noe som gjorde sammenligninger med tidligere Aquatrazmerder mer relevant enn å sammenligne med en kontrollmerd. Det ble derfor valgt å ikke benytte slik merd i dette siste programmet.

I løpet av prosjektet ble det søkt dispensasjon for antallskrav og tetthetskrav, og det ble gitt avgrenset tillatelse til å øke antallet individer per enhet til maksimalt 400 000 stk, samt øke tettheten til maksimalt 45 kg/m³. I forbindelse med dette ble det utarbeidet et tetthetsprogram som omhandlet parametere relatert til tetthet, disse ble knyttet til flere enheter enn de som er fulgt opp i ordinære biologiprogrammene. En oversikt over de biologiske måleprogrammene i prosjektet er gitt i tabell 1. Disse rapportene er tilgjengelige

på hjemmesiden til Fiskeridirektoratet under fanen «Kunnskap fra utviklingsprosjektene».

Tabell 1: Oversikt biologiske måleprogram.

Type program	Tidsperiode	Lokalitet	Tilknyttede rapporter
Biologiprogram 1	okt. 2018 - aug. 2019	Eiterfjorden	AQT-MNH-BIO-002 (halvårsrapport) ²⁵ AQT-MNH-BIO-004 (sluttrapport) ²⁴
Tetthetsprogram	sep. 2019 - sep. 2020	Kyrøyene	AQT-MNH-BIO-007 (sluttrapport) ²⁷
Biologiprogram 2	okt. 2019 - sep. 2020	Kyrøyene	AQT-MNH-BIO-006 (halvårsrapport) ²¹ AQT-MNH-BIO-008 (sluttrapport) ²³
Biologiprogram 3 og tetthetsprogram	jun. 2020 - jul. 2021	Årsetfjorden	AQT-MNH-BIO-009 (halvårsrapport) ²² AQT-MNH-BIO-011 (sluttrapport) ²⁶
Biologiprogram 4	aug. 2021 - sep. 2021	Årsetfjorden	AQT-MNH-BIO-012 (sluttrapport) ¹⁸

Biologiprogrammene har omfattet tema som: produksjonseffektivitet, velferdsindikatorer på individnivå, hjerte- og gjellehelse, lakselus, adferd, vannkvalitet, vannstrøm, produktkvalitet, helsekontroller og slaktekvalitet. I tetthetsprogrammene er det fokusert på ulike velferds- og helseparametere samt vannkvalitet, i tillegg til at driftssikkerhet er berørt. Det vises til rapportene fra programmene for utfyllende informasjon.

4.2 Produksjon i Aquatrazmerder

En viktig milepæl i prosjektet var overføring av første fisk til Aquatrazmerd, på lokalitet Eiterfjorden i Nærøysund kommune, den 16. oktober 2018. I løpet av prosjektperioden har det vært satt ut fisk i Aquatrazmerder på tre forskjellige lokaliteter, henholdsvis Eiterfjorden (35877), Kyrøyene (30076) og Årsetfjorden (35797). Tabell 2 gir en oversikt over utsett av laks i Aquatrazmerdene fra første utsett i *Aquatraz 1* i oktober 2018 til siste utsett i *Aquatraz 4* i januar 2022.

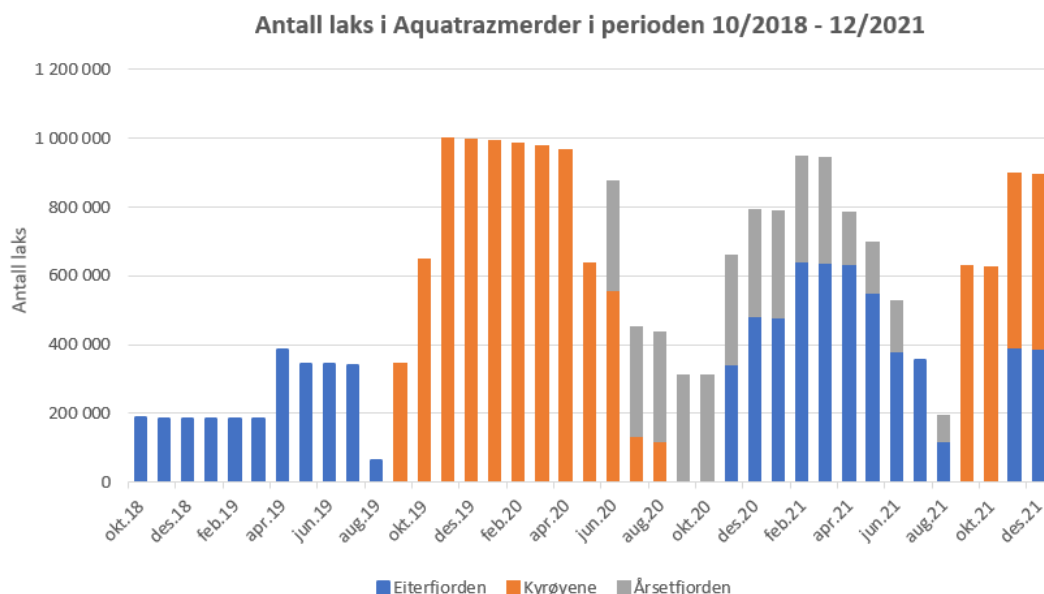
Figur 34 viser antall laks i Aquatrazmerdene ved utgangen av hver måned. I oktober 2019 var antall laks på det høyeste, dvs. ca. 1 millioner laks fordelt på tre Aquatrazmerder.

Høyeste antall laks i Aquatrazmerdene ble oppnådd i forbindelse med antalls- og tetthetsforsøket som ble gjennomført på Kyrøyene med vår-19 generasjonen. Største enkeltutsett av laks er i *Aquatraz 3*, Eiterfjorden i november 2021, med totalt 395 000 smolt. I løpet av prosjektperioden har det vært satt ut totalt ca. 3,8 millioner laks i Aquatrazmerdene, se tabell 2.

Utnyttelsen av biomassen fra utviklingstillatelsene har variert i løpet av prosjektperioden. I perioder har biomassen i Aquatrazmerdene vært så høy at det i tillegg til utviklingstillatelsene er benyttet ordinære tillatelser i dem.

Tabell 2: Oversikt over utsett av laks i Aquatrazmerdene i prosjektperioden med hovedmilepæler

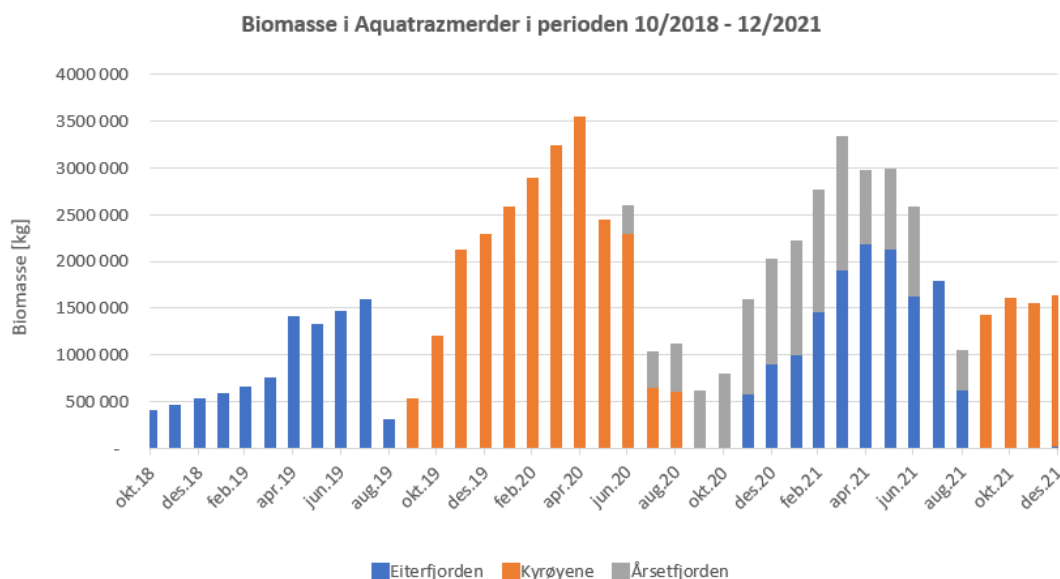
Lokalitet/ generasjon	Merd nr.	Utsett/periode	Antall laks	Prod. biom. (tonn)
Eiterfjorden Vår-18	AQT1, AQT2	10/2018 – 08/2019	384 000	835
Kyrøyene Vår-19	AQT1, AQT2, AQT3	09/2019 – 08/2020	1 036 000	2 073
Årsetfjorden Vår-20	AQT4	06/2020 – 06/2021	312 000	1 265
Eiterfjorden Vår-20	AQT1, AQT2, AQT3	11/2020 – 08/2021	647 000	1 609
Årsetfjorden Vår-20	AG4-R2	08/2021 – 09/2021	135 000	103
Kyrøyene Vår-21	AQT1, AQT2	09/2021 –	627 000	516
Eiterfjorden Vår-22	AQT3	11/2021 –	395 000	37
Årsetfjorden Vår-22	AQT4	01/2022 –	280 000	
Totalt			3 816 000	6 438



Figur 34: Antall laks i Aquatrazmerdene ved utgangen av hver måned for perioden 10/2018 - 12/2021. Antall laks per lokalitet og akkumulerte tall er vist

Figur 35 gir en oversikt over biomasse i Aquatrazmerdene fra 10/2018 til 12/2021, fordelt på lokalitet og akkumulerte tall. Høyeste biomasse oppnådd i Aquatrazmerdene er ca. 3 490 tonn og 3 380 tonn henholdsvis i april 2020 og mars 2021, dvs. at biomassen knyttet til de fire utviklingstillatelsene (3 120 tonn) var fullt utnyttet i disse periodene. Testing med stor biomasse har vært viktig for å validere Aquatrazteknologien, da størrelsen på

biomassen i merden har innvirkning på behovet for vannutskiftning. Samlet netto tilvekst i Aquatrazmerden i løpet av prosjektperioden har vært ca. 6400 tonn biomasse (tabell 2).



Figur 35: Biomasse i Aquatrazmerdene ved utgangen av hver måned for perioden 10/2018 - 12/2012. Biomasse per lokalitet og akkumulerte tall er vist

4.3 Samarbeidspartnere

Gode mål skal være målbare, noe å strekke seg etter, men samtidig mulig å oppnå. I søknaden ble det som beskrevet i innledningen definert mål som senere ble omsatt til suksesskriterier.

For å kunne gjøre gode evalueringer av suksesskriteriene var det nødvendig å sette opp definerte program. Det ble tatt utgangspunkt i momenter fra søknadsarbeid (inklusive innspill fra en biologigruppe satt sammen av folk internt i daværende Midt-Norsk Havbruk og eksterne eksperter), relevant litteratur og arbeidet som ledet fram til suksesskriteriene. I denne prosessen ble det raskt klart at å sette opp gode måleprogram, protokoller og evaluere på en hensiktsmessig måte, forutsatte hjelp fra eksterne gode fagmiljø.

Sterke miljøer innen hvert enkelt fagfelt ble derfor involvert, og teamet knyttet til biologiprogrammene har i all hovedsak vært uforandret. Samarbeidspartnere undervegs har vært følgende firma og institusjoner (sortert etter tema):

4.3.1 Produksjonseffektivitet

BARKBEKKEN

Barkbekken er et konsulentfirma drevet av Arnfinn Aunsmo. Han er veterinær og har en doktorgrad i epidemiologi. Selskapet har utført analyse av sentrale produksjonsparametere og produksjonseffektivitet, samt gjennomført statistiske analyser av datasett fra drift.

Norsk Landbruksrådgiving

Norsk Landbruksrådgiving driver som navnet sier ikke primært med rådgiving til oppdrettsnæringa. Gunnar Aunsmo er her teamleder økonomi og har vært en partner til Arnfinn Aunsmo i arbeidet med økonomiske analyser. Han har også bidratt med bl.a. tidslinjeanalyser av økonomiske og biologiske faktorer i samspill.

SPILLFREE

Spillfree er et firma som bidro med tilsvarende som Barkbekken i begynnelsen av prosjektet, mens Arnfinn Aunsmo jobbet i selskapet.

4.3.2 Hjerne- og gjellehelse

Nofima

Nofima er et ledende matforskningsinstitutt som driver forskning og utvikling for akvakulturnæringen, fiskerinæringen og matindustrien. Veterinær Alf Dalum har gjennomført makroskopiske og histologiske vurderinger av hjerter og gjeller samt flere andre vev.

PHARMAQ Analytiq

Pharmaq Analytiq utfører analyser og rådgivning, deltar i prosjekter og er rettet mot fiskehelsemarkedet. Professor emeritus Trygve T. Poppe var konsultert i tidlig fase av Aquatrazprosjektet for å bidra med innspill til fiskehelse- og fiskevelferdsdelen av prosjektet, og ble den som gjennom sitt virke koplet inn Alf Dalum da de begge jobbet i selskapet på den tiden.

PATOGEN

Patogen utfører analyser og rådgiving, deltar i prosjekter og er rettet mot fiskehelsemarkedet. Alf Dalum jobbet i selskapet en periode i løpet av prosjektet og også mot slutten av prosjektet.

4.3.3 Lakselus

PHARMAQ part of zoetis

Pharmaq er et selskap som utvikler og fremstiller vaksiner og legemidler til arter i oppdrett, og har blant annet fiskehelsebiolog Yngve Lystad i selskapet. Lystad har ekspertise på lakselus, og har bidratt med oppdatert kunnskap og utført analyser av lusetall.

VETERINÆR STURLA ROMSTAD

Veterinær Sturla Romstad er veterinær og spesialist i akvakultursykdommer, har også ekspertise på lakselus og har bidratt med oppdatert kunnskap og analyser av lusetall sammen med Lystad.

4.3.4 Adferd



INAQ er et konsulent- og rådgivingselskap som innehar ekspertise på flere felt, og seniorrådgiver Henning Urke har utført og koordinert adferdsstudier basert på akustisk telemetri. Peder Jansen (doktorgrad i parasittologi), Torstein Kristensen (doktorgrad i vannkvalitet og fysiologi) og John Birger Ulvund (stipendiat og jobber med adferdsstudier) har også bidratt via INAQ.



Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) har blant annet institutt for teknisk kybernetikk, hvor førsteamanuensis Jo Arve Alfredsen arbeider. Alfredsen har bidratt i alle faser av adferdsstudiene med akustisk telemetri, og har også involvert flere studenter i Aquatrazprosjektet.



Thelma Biotel med Eivind Hvam har levert merker som ble brukt til akustisk telemetri.

4.3.5 Vannkvalitet



Norsk institutt for vannforskning (NIVA) har bidratt med kunnskap om og analyser av både vannkjemi, algeanalyser, dyreplankton (luse-larver) og sensordata. Forskningsdirektør Åse Åtland og forsker Sara Calabrese har sammen med forskningsleder Trine Dale, forsker Bibiana Gomez Crespo, seniorforsker Anders Hobæk og postdoc Christina Sørensen tilført prosjektet ekspertise innen ulike felt knyttet til vannkvalitet. NIVA bidro i tillegg til de ordinære biologiprogrammene også i planlegging, design og gjennomføring av det mer spesifikke tetthetsprogrammet.

4.3.6 Produktkvalitet



Nofima har bidratt også innen produktkvalitet, med innspill før prosjektet var i gang og gjennom hele prosjektperioden. Turid Mørkøre var seniorforsker i Nofima da prosjektet startet, og forsker Thomas Larsson var med på arbeidet fra tidlig fase og gjennom hele prosjektperioden. Han har utført analyser av kvalitet og sett resultatene opp mot blodanalyser og funn fra histologidelen av programmet.

4.3.7 Vannstrøm



Aqua Kompetanse sin vanndynamikkavdeling med oseanografene Linda Hagen, Karen Fosse Siversten og Benedicte Otterdal Nergaard har bidratt med målinger og analyser av vannstrøm samt analyser av CTDO-data.

4.3.8 Velferdsvurderinger, div. biologispørsmål og prosjektledelse



Aqua Kompetanse har bidratt med flere personer og på flere felt. Veterinær Torolf Storsul var ansatt i daværende Midt-Norsk Havbruk og har vært med gjennom hele prosjektet fra Alf Reidar Sandstad presenterte sin idé til Midt-Norsk Havbruk, via søknads- og planleggingsarbeid til gjennomføringsfasen av prosjektet. Storsul har den siste delen av prosjektet vært ansatt i Aqua Kompetanse og har gjennomført mange prøveuttak og en del feltarbeid samt vært prosjektleder for biologidelen av prosjektet. FoU-koordinator Lauris Boissonnot, statistiker Camilla Karlsen og veterinær Alexander Figenschou har bidratt til analyser av velferdsscoringer, utføring og tilveksthastighet på døgnnivå, dødelighet og dødelighetsårsaker samt slaktedata i samarbeid med Torolf Storsul.

4.3.9 Om samarbeidet

Midt-Norsk Havbruk (nå SalmoNor) har gitt betydelige bidrag til biologidelen av prosjektet, dette inkluderer blant annet kunnskap/kompetanse, erfaringer og bidrag til oppfølging og rapporter. Fiskehelsebiolog Marte Andrea Fjær har oppsummert helsekontroller og helsetilstand, og gitt innspill på funn og undersøkelser utført av partnere. Blant annet svært gode innspill på oppfølging av slaktekvalitet sett i sammenheng med andre faktorer.

Driftsledere og røktere har bidratt til å samle og systematisere data, tilrettelagt og hjulpet til på mange prøveuttak og kommet med gode innspill. Nøyaktighet og oppfølging har bidratt til kvaliteten på prøver og data.

Idéhaver og leder for den tekniske delen av prosjektet, Alf Reidar Sandstad, har hatt tett dialog med og bidratt aktivt til diskusjoner i biologigruppa. I enkelte tilfeller har det blitt jobbet tverrfaglig med komplekse tekniske/fysiske og biologiske problemstillinger, dette har også involvert Sandstad og prosjektleder Steingrim Holm. Da har det vært avgjørende for fremdrift og resultat at man har hatt respekt for hverandres synspunkter, god og fortløpende dialog og et løsningsorientert handlingsmønster.

Arnfinn Aunsmo har vært koplet ekstra tett på prosjektet i perioder og bidratt ut over det som opprinnelig var planlagt. Det har gitt betydelig merverdi i form av kunnskap, analyser og beslutningsstøtte.

Gruppa tilknyttet biologiprojektet har hatt innsyn i hverandres metoder og resultater, og det har vært både uformelle diskusjoner samt flere møter der utforming av program, resultater og rapporter er diskutert i plenum eller i mindre grupper. Prosjektet har på den måten lagt til rette for tverrfaglig meningsutveksling, noe som har gitt en tilleggsverdi ut over bidraget fra hver enkelt. Dette har resultert i viktige innspill til utvikling av konseptet som man ellers kunne gått glipp av.

5 Evaluering av prosjektet vs. interne suksesskriterier

De interne suksesskriteriene (kapittel 2.7) er benyttet aktivt underveis i prosjektet for effektivt å kunne gjøre valg og prioriteringer. Hastigheten på utviklingen har vært høy og noe av dette kan sannsynligvis tilskrives disse konkrete målsetningene.

En evaluering av oppnåelsesgrad for disse kriteriene må gjøres som en samlet vurdering av resultater i prosjektet. For noen av suksesskriteriene er det naturlig å se på hva man oppnådde mot slutten av prosjektet, etter å ha gjort ulike modifikasjoner underveis (f.eks. ikke behov for avlusing), mens for andre suksesskriterier må hele perioden vurderes samlet (f.eks. rømningssikker teknologi). Kategorier brukt i en forenklet vurdering er beskrevet i tabell 3. Her legges til grunn at teknologien kan ha en negativ påvirkning av kriteriet, en nøytral situasjon er definert som ingen forskjell sammenlignet med konvensjonell teknologi, eller det kan være ulike grader av oppnåelse av suksesskriteriet.

Tabell 3: Fargekoder brukt i vurdering av oppnåelsesgrad for suksessindikatorer

Oppnåelse	Fargekode
Negativ påvirkning	÷
Ingen eller i liten grad	0
I noen grad	+
I stor grad	++

I tabell 4 er alle suksessindikatorer vurdert med fargekodene fra tabell 3. Suksessindikatoren «Bedre fiskehelse og fiskevelferd» hadde flere underpunkter, og det er disse underpunktene som er vist i tabellen. For en utdypende vurdering vises det til kapittel 5.1, og for ytterligere utfyllende stoff henvises det til tidligere rapporter i prosjektet.

Tabell 4: Oppnåelsesgrad for suksessindikatorer. Bedre fiskehelse og fiskevelferd er delt opp i underpunkter som beskrevet i kapittel 2.

Suksessindikator	Oppnåelse
Bedre hjertehelse og kondisjon	0
Bedre gjellehelse	+
Ikke behov for avlusing	++
Lavere stressnivå og skaderisiko ved trenging	++
Bedre velferd og lavere dødelighet	++
Bedre produktkvalitet	+
Rømningssikker teknologi	++
Forbedret HMS	++
Høyere effektivitet/økonomisk foretrukket teknologi	++

5.1 Bedre fiskehelse og fiskevelferd

Bedre fiskehelse og fiskevelferd ble satt opp som et kriterium som kunne oppnås i form av flere elementer som beskrevet i kapittel 2. Disse beskrives i den følgende teksten:

5.1.1 Bedre hjertehelse og kondisjon

Strømsettere ble brukt til å sette opp en roterende vannstrøm i merden i de tre første biologiprogrammene. I det første biologiprogrammet ble det testet ut to ulike teknologier for å sette vannet i bevegelse, en ejektor og en propell. Det ble raskt klart at propellstrømsetteren hadde betydelige fordeler med hensyn til effektivitet og kostnader, og det var denne teknologien som ble videreført i de påfølgende to biologiprogrammene. Det ble også gjort flere endringer i kapasitet, tekniske løsninger og plassering av strømsetterne, der man endte opp med fire strømsettere.

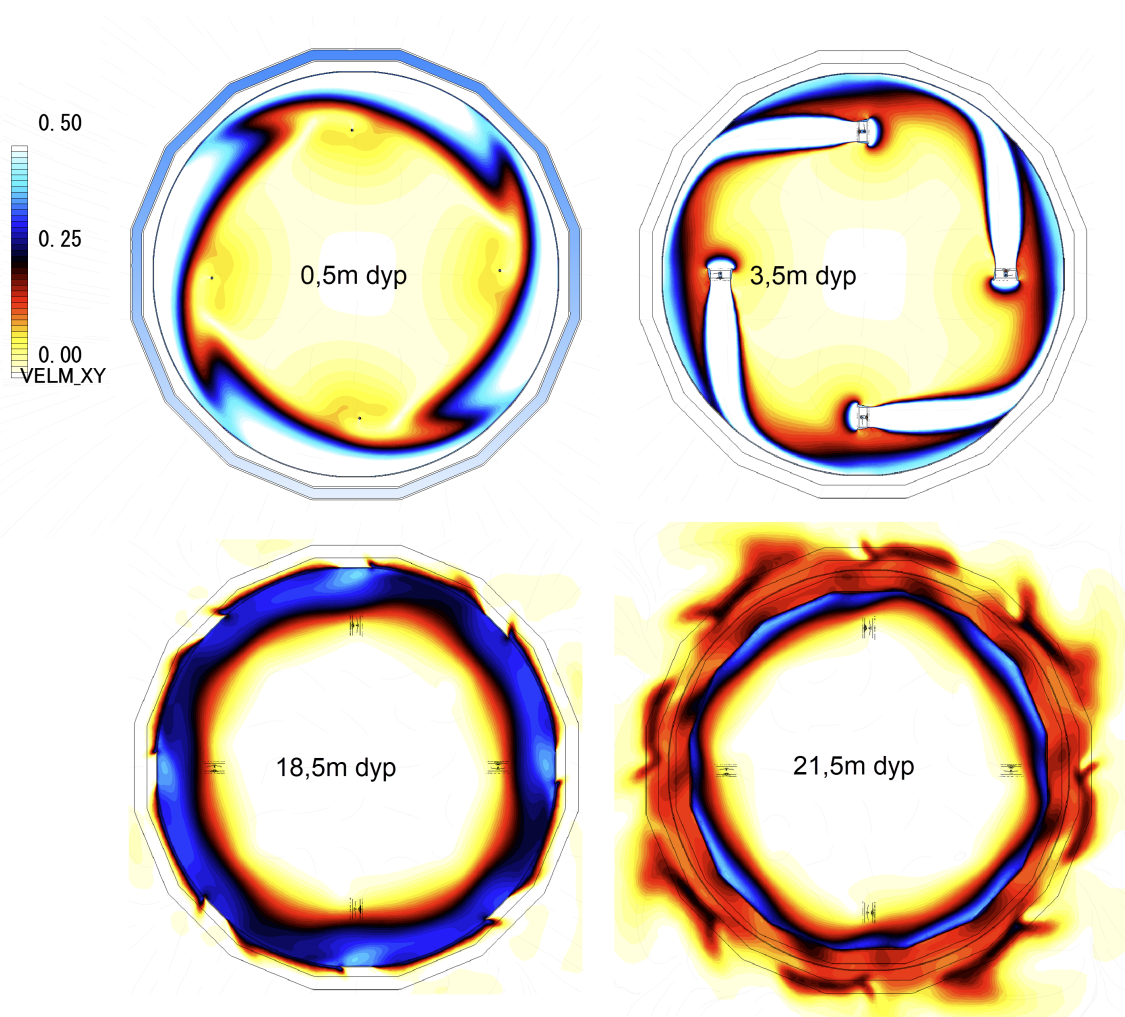
Med fire strømsettere på 5,5 kW ble rotasjonshastigheten i den ytre delen av merden målt til ca. 25 cm/s nær overflaten. Vannets rotasjon beholdes i stor grad gjennom hele merdens dybde som vist i figur 36.

I det fjerde biologiprogrammet var strømsettere kun en reserveløsning, da hovedsaken i det programmet var å prøve ut en helt ny løsning for å sette opp en vannstrøm. Det var også i det programmet tatt høyde for en betydelig vannstrømhastighet, slik at prinsippet med å sette opp en vannstrøm for fisken ble beholdt.

Før søknaden om utviklingstillatelse ble sendt var det godt kjent at det å gi laks trim i ferskvannsfasen, i form av økt vannstrømhastighet, hadde flere positive effekter. Blant annet viste FitSmolt-prosjektet⁶ at settefisk som hadde fått en passe forhøyet vannstrømhastighet i hele sitt livsløp hadde større hjertemuskel (høyere ventrikelmasse), og hos smolt var hjertets slagvolum større og hemoglobinnivået i blodet høyere. I utholdenhetstester kom fisk som hadde gått i økt vannstrømhastighet klart bedre ut, og i smitteforsøk med pancreas disease (PD) var overlevelsen klart bedre. Tilveksten var også bedre. I sjøfasen eller for større fisk var det ikke like mye dokumentasjon på effekter av økt vannstrømhastighet, men det var ingen grunn til å tro at liknende mekanismer ikke kunne gjøre seg gjeldende.

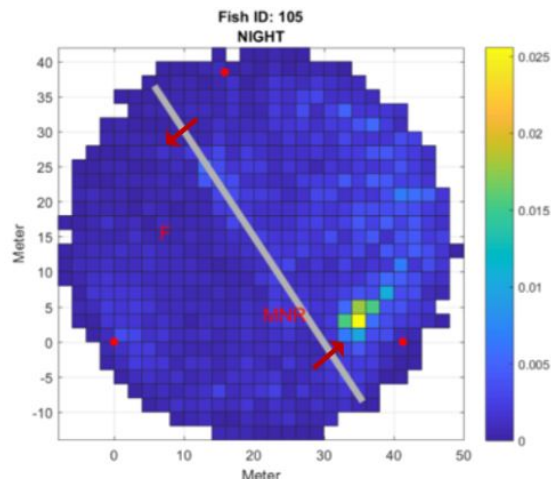
I tiden som har gått siden søknaden ble sendt har det kommet til en del kunnskap om vannstrømhastighet og adferd/velferd, og det er blant annet vist sammenheng mellom laksens minimum brutto *Cost of transport* (energi brukt per tilbakelagt distanse) som er den teoretisk optimale svømmehastighet for å tilbakelegge lengre distanser på et begrenset energibudsjett, og laksens frivillige eller foretrukne svømmehastighet i merd⁸.

I Aquatrazmerd med strømsettere vil det i motsetning til i mange kontrollerte forsøk og flere andre konsepter under utvikling, være betydelige variasjoner i vannstrøm internt i merden, fra en betydelig hastighet like bak en strømsetter på ca. 2 m/s til hastigheter omtrent som i kommersielle merder i sentervolumet av Aquatraz. Vi har mange observasjoner, gjennomgående i alle de tre biologiprogrammene, hvor laks frivillig oppsøker områdene like bak strømsetterne med de høyeste vannstrømhastighetene. Dette kunne enkelt observeres fra merdkanten eller gangbroa på merden, og det var også svært tydelig ved bruk av undervannskamera.



Figur 36: Hastigheter i horisontalplanet for G3

Adferd ble overvåket i de tre første biologiprogrammene ved hjelp av akustisk telemetri (se utfyllende omtale i kapittel 6.3.5). Noen individer fikk merker operert inn i bukhulen og posisjoneringen i merden kunne spores svært hyppig. Dette ga en god oversikt over enkeltindividers preferanser for posisjonering i merden, og i perioder av døgnet med liten forstyrrelse av føring og menneskelig aktivitet ble det tydelige at mange individer foretrakk posisjoner like bak en strømsetter (figur 37).

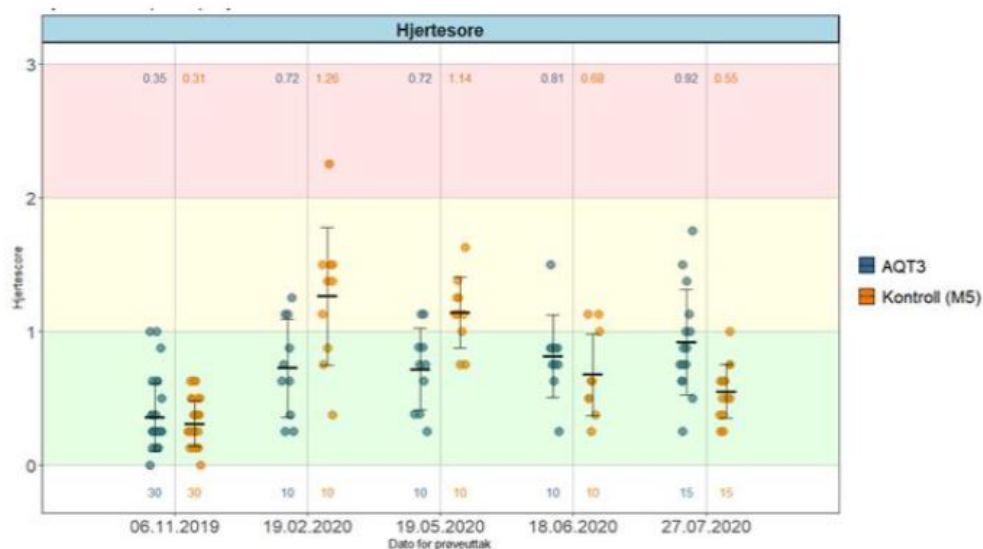


Figur 37: Horisontalplott av posisjoner om natten for merket individ i Eiterfjorden over en periode på 25 dager i november/desember 2018. Fordelingen er vist som frekvenser av registreringer i hver rute i horisontalplanet der gult representerer hyppige registreringer og blått sjeldne registreringer. F=utføringssted, MNR= Midt-Norsk-ring (upwellingsystem), røde prikker er plassering av hydrofoner som mottar signaler fra fisk, røde piler er plassering av strømsettere og strømretning, grå tverrgående strek er gangbro.

Hjertehelse ble målt ved hjelp av rutinemessige prøveuttak fra tilfeldige individer fra Aquatrazmerd og kontrollmerd i de tre første biologiprogrammene. Det ble gjort makroskopiske vurderinger med et scoringssystem og hjertene ble fotografert i fire plan, helt hjerte ble veid og hjertets ventrikkle ble veid for seg selv. Videre ble det tatt histologiske snitt som ble farget og vevsforandringer ble vurdert ved hjelp av en histologisk hjertescore.

I det første biologiprogrammet ble det ikke funnet signifikante forskjeller på de undersøkte hjerteparametrene mellom Aquatrazmerden og kontrollmerden, her var det også kun to strømsettere og lavere vannstrømhastigheter enn i biologiprogram 2 og 3.

I det andre biologiprogrammet ble det funnet en tendens til høyere kardiosomatisk indeks (forhold mellom hjertevekt og kroppsvekt) hos fisk fra Aquatrazmerden. Histologisk hjertescore var bedre i Aquatrazmerd i to av fem undersøkelser og bedre i kontrollmerd i én av de fem undersøkelsene (figur 38). Makroskopisk score viste ingen forskjeller mellom Aquatrazmerd og kontrollmerd.



Figur 38: Grafisk framstilling av histologisk hjertescore fra det andre biologiprogrammet, på Kyrøyene. Fisk fra Aquatrazmerd indikert med blå prikker og fisk fra kontrollmerd vist med oransje prikker.

Det tredje biologiprogrammet viste heller ingen klare tendenser for hjertestatus, der histologisk hjertescore ved én av undersøkelsene var signifikant bedre i kontrollmerd mens det ved de andre undersøkelsene var mindre forskjeller. For makroskopisk score var det også kun én av undersøkelsene som ga signifikant utslag, i det tilfellet var resultatet best på fisk fra Aquatrazmerden.

Oppsummert er det vanskelig å konkludere ut fra det undersøkte materialet og det er dermed ingen klar tendens i den ene eller andre retningen med hensyn til hjertehelse.

Den viktigste årsaken til at det ikke ble registrert bedret hjertehelse antas å være at det ble oppnådd lavere vannstrømhastigheter i merden enn forutsatt da suksesskriteriet ble definert. I henhold til tilgjengelig litteratur (blant annet¹¹) burde hastigheten vært betydelig høyere for å gi positiv effekt for aktuell fiskestørrelse og temperatur. Videre ble det ikke spesifikt sett på hjerter fra individer som foretrakk å stå i de delene av merden hvor vannstrømmen var kraftigst, da det ikke var mulig å spore posisjonsmerkede individer ved slakt. Dette ville åpnet opp for å studere forskjeller mellom individer med ulik adferd relatert til posisjonering, vannstrømhastighet, svømmehastighet osv.

5.1.2 Bedre gjellehelse

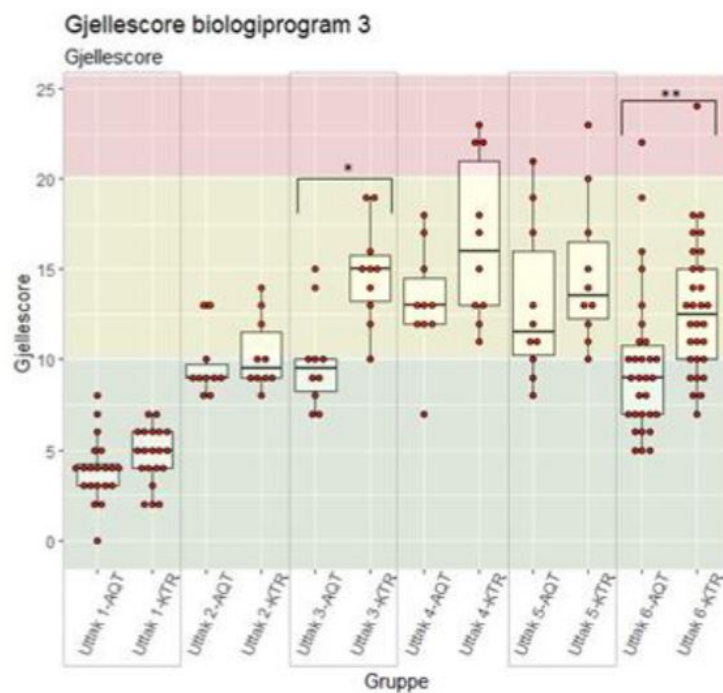
Hypotesen om bedre gjellehelse var basert på kunnskapen om at det ofte er høyst konsentrasjon av plankton i den øverste delen av vannsøylen og at noen planktonarter kan belaste eller skade gjeller. Med et dypere vanninntak vil Aquatrazmerden dermed kunne bidra til lavere belastning på gjellene.

Gjellehelse ble målt ved hjelp av standardiserte uttak av gjellevev fra de samme individene som ble undersøkt for hjertehelse. Også her ble det brukt et scoringssystem for histopatologiske forandringer.

Det første biologiprogrammet inneholdt undersøkelser på fire ulike tidspunkt, og startuttaket viste svært lik gjellestatus i Aquatrazmerd og kontrollmerd. Dette ga et godt utgangspunkt for videre sammenlikning. For alle de tre påfølgende prøveuttakene var det bedre gjellescore i Aquatrazmerden, og avstanden var størst mellom de to gruppene i uttaket som ble gjort på våren da fisken var på andre året i sjøen.

I biologiprogram nummer to ble det ikke funnet signifikante forskjeller i gjellescore mellom Aquatrazmerd og kontrollmerd. Dette biologiprogrammet ble gjennomført på en mer eksponert lokalitet enn de andre programmene, og det var i likhet med det første programmet kun skjerming ned til 8 meter dybde. Det er mulig at omrøringen i de øverste vannlagene her var større enn i de andre biologiprogrammene, og at det kan ha bidratt til å utjevne forskjeller i vannkvaliteten.

Det tredje biologiprogrammet hadde seks undersøkelsestidspunkt, og også i dette programmet var det i startuttaket svært lik gjellestatus i Aquatrazmerd og kontrollmerd. Resultatene i de påfølgende undersøkelsene viste samme tendens som i det første biologiprogrammet, med en gjennomgående tendens til bedre (lavere) gjellescore for fisk fra Aquatrazmerden. Ved to av undersøkelsene var resultatet signifikant forskjellig med best resultat for Aquatrazfiskene (figur 39).



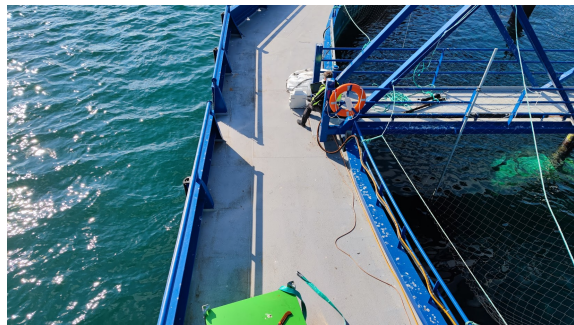
Figur 39: Grafisk framstilling av histologisk gjellescore i det tredje biologiprogrammet. Grønt skravert område indikerer vevsforandringer av mild karakter, gult område vevsforandringer av moderat karakter, og rødt område vevsforandringer av omfattende karakter. Det sees en tydelig trend med høyere gjellescore hos fisk fra kontrollmerd sammenlignet med Aquatrazmerd, og denne var statistisk signifikant ved uttak 3 og 6 (tosidig T-test for hvert uttakstidspunkt: * $p < 0.05$, ** $p < 0.001$).

Vannprøver ble også analysert for algeforekomst i hvert av de tre første biologiprogrammene. Den gjennomgående tendensen er at det ikke ble registrert forskjeller i algemengde eller

artssammensetning mellom Aquatrazmerd og kontrollmerd. I det siste biologiprogrammet viste et uttak midt på sommeren en tendens til lavere algemengde i Aquatrazmerden, men det var ikke signifikant forskjell.

Hovedtrekkene med hensyn til gjellehelse karakterisert ved histologisk vurdering av tilfeldige fisk fra de ulike merdsystemene er at det enten var bedre eller lik gjellehelse i Aquatrazmerdene sammenlignet med kontrollmerdene. Resultatene fra algeanalysene støtter ikke opp under hypotesen om at det skulle være lavere nivå av alger ved inntak av dypvann i Aquatraz, men det er verdt å merke seg at algeanalyser er øyeblikksbilder, og man vet at algekonsentrasjoner og artssammensetning på et gitt sted i havet kan endre seg mye innenfor et begrenset område og i løpet av kort tid.

Visuelle observasjoner på merdkanten har ved flere tilfeller vist mye klarere vann inne i Aquatrazmerden enn utenfor (figur 40), dette fremkom særlig tydelig i det tredje biologiprogrammet hvor skjermingen var dypest. Dette kan tyde på at planktonkonsentrasjonen har vært lavere i perioder. Ettersom gjelleforandringer kan komme som en mer langsiktig respons på en planktonpåvirkning, gir dette i sum grunnlag for å mistenke at den generelle tendensen til bedre eller lik gjellehelse i alle biologiprogrammene kan skyldes lavere algekonsentrasjoner. Dette underbygges også av at tendensen til bedre gjellehelse er tydeligst på de mer beskyttede lokalitetene og spesielt i det tredje biologiprogrammet hvor skjermingen i betydelige perioder gikk ned til 18 meters dybde.



Figur 40: Farge på vann inne i og utenfor Aquatrazmerden. Prosjektleder Steingrim Holm på gangbroa. Foto fra *Aquatraz 4* i Årsetfjorden 08.06.2021.

5.1.3 Ikke behov for avlusing

Ved oppstart av prosjektet ble dette suksesskriteriet sett på som et langsiktig mål, og det var relativt klart at det ikke ville nås med kun 8 meter skjerming. Årsaken til at det likevel ble valgt 8 meter stålskjørt var at dybden tilsvarte presenningskjørtene daværende Midt-Norsk Havbruk hadde erfaring med fra tidligere og at med den begrensede dybden ble det ikke behov for avanserte vannforsyningssystemer med redundans. Dette ble sett på som et startpunkt for å høste erfaringer, for derfra å bevege seg trinn for trinn mot målet.

Felles for alle biologiprogrammene er at det ble flyttet inn fisk i Aquatrazmerdene som allerede hadde stått i konvensjonelle merder. For å minimere forekomsten av lakselus ved oppstart ble det i de to første programmene avluset ved innflytting i Aquatrazmerden. I det tredje biologiprogrammet var lusetallene så lave at det ikke ble avluset ved innflytting.

I det første biologiprogrammet var smittepresset av lus lavt gjennom store deler av perioden, og det ble ikke gjennomført avlusing i Aquatrazmerden eller kontrollmerden. På slutten av produksjonsperioden ble det imidlertid en betydelig stigning av lusetallene i begge gruppene, og dersom fisken ikke hadde gått til slakt ville det blitt behov for avlusing. Forskjellen mellom gruppene var små, og det var tydelig at skjermingen ikke

var tilstrekkelig til å nå målet. Hvorvidt det var skjermingen på 8 meter i seg selv og/eller andre faktorer som betydde mest er usikkert. I sluttrapporten ble det diskutert hvorvidt hevinger av Aquatrazmerden på forsommeren kan ha sluppet inn luselarver som bidro til det videre forløpet, og om det kan ha kommet inn bevegelige lus i Aquatrazmerden fra nabomerder eller nabolokaliteter. Det ble i programmet tatt ut vannprøver og analysert for luselarver. På to tidspunkt på forsommeren ble det registrert høyere antall luselarver i Aquatrazmerden enn i kontrollmerden. Hvorvidt det skyldtes en reell høyere konsentrasjon er beheftet med usikkerhet, da vannstrømmen i Aquatrazmerden gjorde at hvert håvtrekk filtrerte større mengder vann. Betydningen av haloklinen ble også diskutert, da en ny publikasjon³ viste til at infektive stadier av lakselus ble oppkonsentrert like under ferskvanns/brakkvannslaget i vannsøylen.

Det andre biologiprogrammet ble gjennomført på lokaliteten Kyrøyan som er mer eksponert. Fortsatt var skjermingen i Aquatrazmerden 8 meter stålskjørt, mens den konvensjonelle merden hadde presenningskjørt i deler av produksjonsperioden. I dette biologiprogrammet var lusepresset betydelig høyere enn i foregående program, og avlusingen ved oppstart av programmet var ikke tilstrekkelig effektiv. Dette gjorde at programmet startet med betydelige lusemengder i både Aquatrazmerd og kontrollmerd. Det videre forløpet viste likevel en tydelig forskjell hvor Aquatrazmerden hadde en langt bedre luseutvikling. Dette gjaldt hele perioden sett under ett og også spesifikt i den perioden den konvensjonelle merden hadde påmontert skjørt. Dette materialiserte seg både i form av saktere luseutvikling og færre avlusinger. I dette biologiprogrammet ble betydningen av haloklinen videre diskutert, og det ble anbefalt videre vurdering av skjørtedybde på ulike lokaliteter. Vannprøver ble analysert for luselarver, og det ble generelt funnet få larver i både Aquatrazmerd og kontrollmerd.

Dypere skjerming ble testet ut i det tredje biologiprogrammet, hvor man i første del av produksjonen hadde lave lusetall og skjerming ned til 18 meters dybde ved hjelp av påmontert presenning utenpå merdvinduene (figur 41). Dybden på skjermingen ble valgt ut fra resultater blant annet fra snorkelmerdforsøkene¹⁴ og dokumentasjon av luseutvikling i lukkede merder¹², samt hva som var teknisk og praktisk mulig å få til som en modifikasjon av en eksisterende merd.



Figur 41: *Aquatraz 4* påmontert 10 meter presenningskjørt i tillegg til den opprinnelige skjermingen med 8 meter stålskjørt.

Oksygenforholdene på lokaliteten gjorde imidlertid at det på høsten, ca. 4 måneder ut i programmet ble fjernet skjørt fra alle konvensjonelle merder på lokaliteten og på Aquatrazmerden ble 2 av de 8 presenningene fjernet. Til tross for dette var forskjellen mellom merdene tydelig, og den økede dybden på skjermingen hadde trolig god effekt. Det var også her betydelig saktere luseutvikling og færre avlusinger. Spørsmålet om det kan bli raskere utvikling av lakselus når det først kommer kjønnsmodne lus inn i Aquatrazmerden ble diskutert, og det ble konkludert med at dette ikke så ut til å være tilfelle. Tvert imot så det ut til at egg og larver ble fjernet fra merden før de

ble infektive på grunn av vannsirkulasjonen. Det ble vist til at en lokalitet kun bestående

av Aquatrazmerder kan gi en svært gunstig utvikling av lakselus. Håvtrekk/ vannprøver for luselarver ble analysert også i dette biologiprogrammet, og man fant svært få larver gjennom programmets varighet, både i Aquatrazmerd og kontrollmerd.

Biologiprogrammene har fulgt den første produksjonen i hver nye generasjon av Aquatrazmerden. I tillegg til dette har det i prosjektperioden blitt produsert i de andre Aquatrazmerdene (tabell 2), blant annet i Eiterfjorden på V20-generasjonen. Her ble det flyttet fisk inn i tre Aquatrazmerder på vinteren. I de to Aquatrazmerdene hvor det ble gjennomført avlusning samtidig som overføring av fisk ble det ikke avluset fram til slaktetidspunkt.

Suksesskriteriet om å unngå avlusning fra utsett til slakt ble ikke testet ut for en hel produksjonssyklus fra smolt til slaktestørrelse. Imidlertid ble det gjort erfaringer som tilsier at målet om null avlusning gjennom en hel produksjonssyklus kan være oppnåelig med skjerming minst like god som i første del av det tredje biologiprogrammet, før de to presenningskjørtene ble fjernet. Det kan også bemerkes at fjerningen av presenningskjørtene i det tredje biologiprogrammet ikke ga den ønskede endringen i oksygennivå, og i ettertid ser man at andre tiltak ville vært minst like effektive. Disse erfaringene er av betydning for design av senere generasjoner og de observerte effektene bidro i stor grad til å øke prosjektets forståelse av vanndynamikken i Aquatraz og samspillet mellom interne og eksterne faktorer.

5.1.4 Lavere stressnivå og skaderisiko ved trenging

I konvensjonelle merder trenges fisken vanligvis ved hjelp av orkastnot eller ved å line opp nota og deretter begrense tilgjengelig volum for fisken med kulerekke. Ved slik trenging ligger sugeslangene for levering i den øvre delen av kastet mens gjentatte observasjoner viser at fisketettheten er høyest i den lavere delen av tilgjengelig vannsøyle (se også⁵). Med dette som utgangspunkt ønsket prosjektet å avklare om det var bedre å ta ut fisken på det laveste tilgjengelige punktet i vannsøylen og slik sikre tilstrekkelig tetthet for en effektiv pumping samtidig som tettheten i resten av merden ville være lavere. Om hypotesen med hensyn til tetthet stemte burde den også medføre et lavere stressnivå og redusert skaderisiko ved levering.

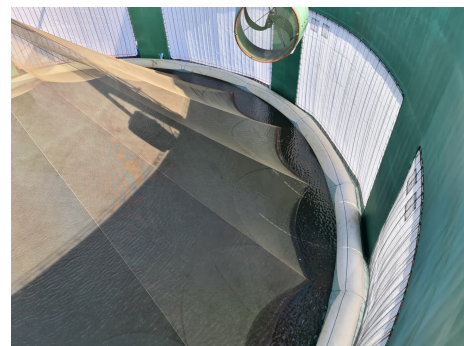


Figure 42: *Aquatraz 4* med heist not.

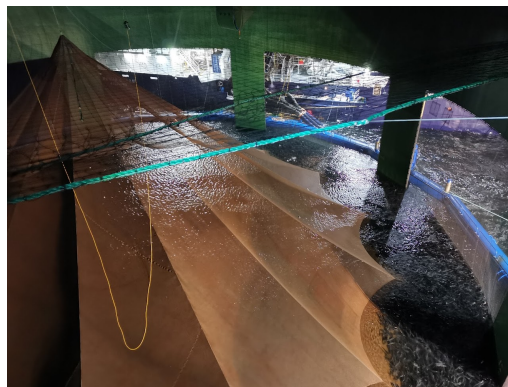


Figure 43: Trenging ved første levering av fisk fra *Aquatraz 1* 20. mai 2019.

Planen var å registrere fiskens posisjon under levering ved hjelp av akustisk telemetri hvor transpondere i et utvalg av fisk sender lydsignaler som fanges opp av tre hydrofoner og slik muliggjør triangulering og posisjonsbestemmelse i 3 dimensjoner (se videre omtale av telemetri i kapittel 6.3.5). Dette viste seg imidlertid vanskelig i praksis da heving av merden og samtidig flytting av hydrofoner ikke lot seg gjøre. Kameraobservasjoner utført under trenging har imidlertid vist høyere tetthet med økende dybde. Vi

dere var det enkelt å tilpasse tettheten til ønsket leveringshastighet, og det antas at dette skyldes at den stive formen på merden gir stabil fasong på tilgjengelig volum for fisken (figur 42) samt svært god kontroll på gradvis regulering av tilgjengelig volum (figur 43 og 44). Visuelle observasjoner har indikert lavere overflateaktivitet i merden sammenlignet med konvensjonelle metoder med tilsvarende leveringshastighet. Det ble ikke observert uhell eller skadet fisk i forbindelse med trenging i Aquatrazmerd i prosjektets varighet.

Som følge av kapasitet til større biomasse i Aquatrazmerden enn det én enkelt brønnbåt kan laste, var det ved avlusinger nødvendig å først flytte flere brønnbåtlaster med fisk fra Aquatrazmerd til en konvensjonell merd, for deretter å ta avluset fisk tilbake i Aquatrazmerden. Dette medfører dobbel håndtering for en stor andel av fisken, og dermed økt totalbelastning. Dette vanskeliggjør evaluering av trenging i Aquatrazmerden. Imidlertid er det ingen indikasjoner for at belastningen ved trenging har vært høyere i Aquatrazmerden sammenlignet med konvensjonelle merder. De observasjonene som har vært gjort har tvert imot pekt mot bedre kontroll og en lavere belastning ved trenging i Aquatrazmerd.



Figur 44: Lasting av fisk på Kyrøyene 15. desember 2019.

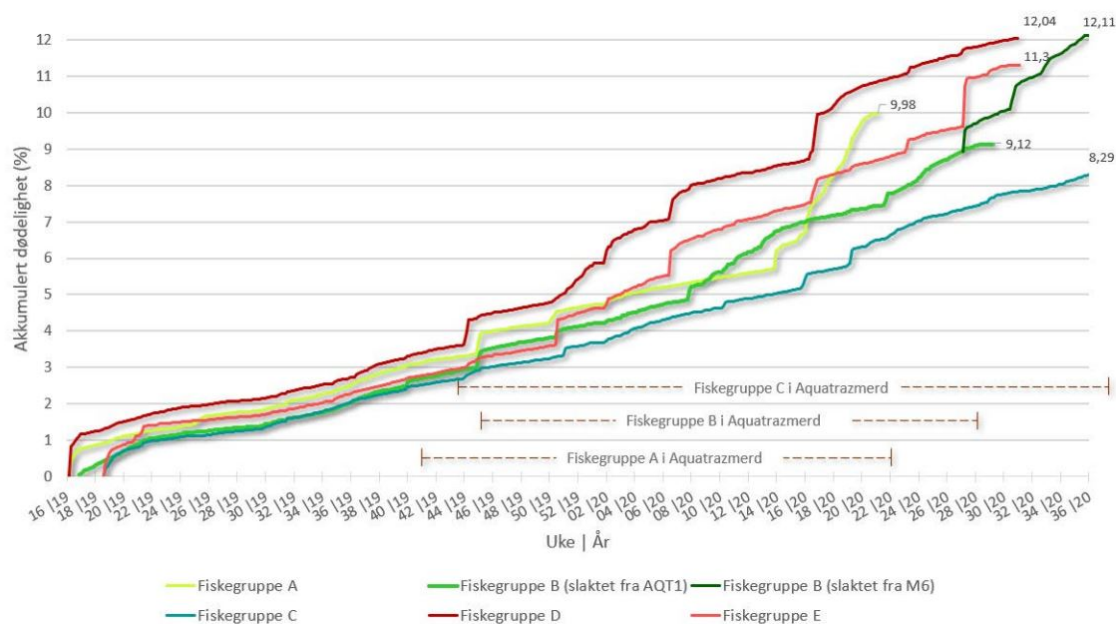
5.1.5 Bedre velferd og lavere dødelighet

Bedre velferd og lavere dødelighet er ansett som en samleindikator; dersom man lyktes med ovenstående suksesskriterier burde dette gi bedre velferd og lavere dødelighet.

I de to første biologiprogrammene kom fisken i Aquatrazmerden ut med lavere dødelighet enn fisken i kontrollmerden. I det første biologiprogrammet var det heller ingen avlusinger i Aquatrazmerd og kontrollmerd som forstyrret bildet, eneste håndtering var ved trenging til delslakt.

På lokaliteten med det andre biologiprogrammet ble det også gjennomført et tetthetsprogram hvor alle merdene på lokaliteten ble fulgt. Her hadde også fisken i Aquatrazmerdene lavere dødelighet enn fisken i de konvensjonelle merdene, på tross av høyere tetthet (figur 45). Ikke overraskende pekte avlusinger seg ut som den største umiddelbare risikofaktoren, samt påfølgende sårutvikling etter håndtering/avlusing. Dette gjaldt for både Aquatrazmerder og konvensjonelle merder. Denne trenden gjelder for alle undersøkelser i programmet, og også funnene fra monitorering av operative velferdsindikatorer på individnivå gir sterk støtte til at håndtering/avlusing har stor betydning. Dette understreker også viktigheten av å nå suksesskriteriet om å unngå håndtering fra utsett til slakt.

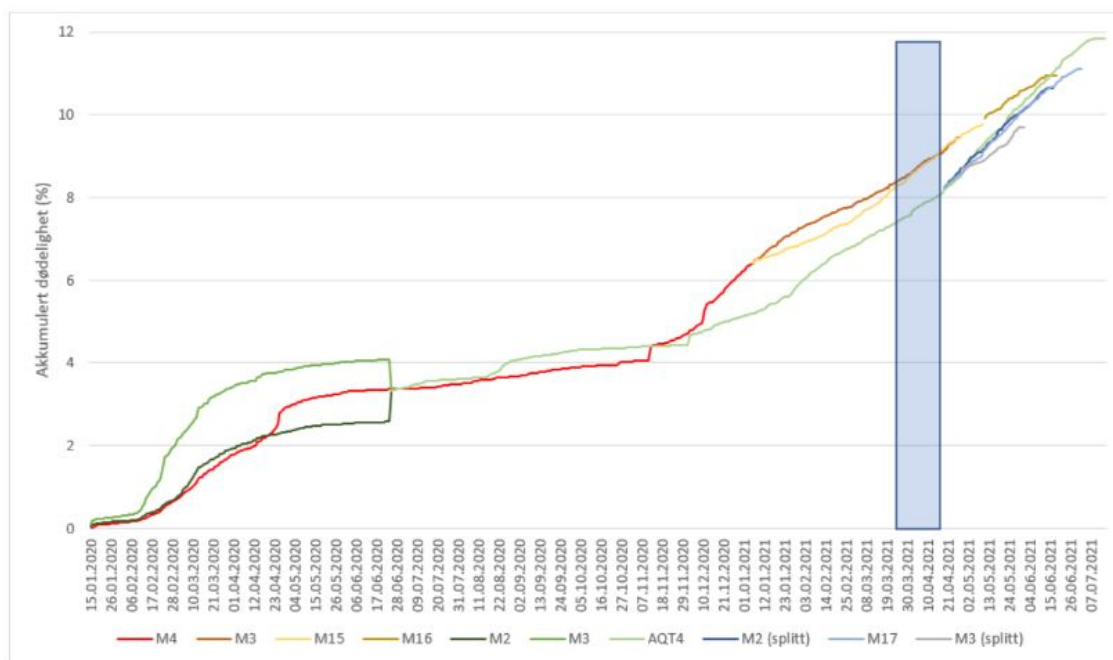
Også i det tredje biologiprogrammet var det sammenfall mellom dødelighet og håndtering/avlusing. Ved oppstart av programmet ble det flyttet fisk fra konvensjonell merd til Aquatrazmerd uten at det ble avluset samtidig, mens fisken i den konvensjonelle kontrollmerden sto urørt. Det ble noe forhøyet dødelighet i Aquatrazmerden i tiden etter flytting, og det ble observert sår hvor sårenes plassering og karakter var forenlig med trengekader.



Figur 45: Akkumulert dødelighet for alle merder hvor det andre biologiprogrammet og tetthetsprogrammet ble gjennomført. Aquatraxmerder i grøntoner, konvensjonelle i rødtone. Fiskegruppe A, B og C sto i Aquatraxmerd i deler av produksjonstida, indikert på figuren. Fiskegruppe C var gjenstand for fullstendig biologiprogram hvor fiskegruppe E var kontrollmerd.

Videre var dødeligheten lav i begge merdsystemene fram til den første avlusingen som innebar håndtering. Etter dette punktet kom man aldri mer ned på like lav dødelighet over noe tid. I store deler av programmets varighet var den akkumulerte dødeligheten i Aquatraxmerden lavere enn i kontrollmerden. Den siste avlusingen som ble gjort i Aquatraxmerden medførte imidlertid en økning i dødeligheten, noe som sammen med lenger produksjonstid enn kontrollmerden medførte høyere dødelighet totalt sett. I perioden med fisketetthet beregnet til å være over ordinær grense på 25 kg/m^3 var det ikke høyere dødelighet i Aquatraxmerden enn i kontrollmerden (figur 46).

Oppsummert har produksjonen i Aquatraxmerd for alle programmene med unntak av perioder av det siste biologiprogrammet hatt lavere dødelighet. Den reduserte dødeligheten kan skyldes mange faktorer, men den viktigste ser ut til å være lavere antall håndtering/avlusinger.



Figur 46: Akkumulert dødelighet for *Aquatraz 4* (AQT4) og kontrollmerd (KTR) i det tredje biologiprogrammet, inklusive historikk før biologiprogrammets oppstart samt splittings til flere merder i sluttproduksjonen. Fisken som ble satt ut i M2 og M3 ble satt over i AQT4 i juni 2020 (alle i grønne sjatteringer). Fisken fra AQT4 ble våren 2021 splittet til M2, M3 og M17 (blå og grå fargetoner). Fisken som ble satt ut i M4 (rød linje) fungerte som kontrollmerd, og ble senere splittet til M3 og M15 (gul og brun). Fisken i M15 ble senere flyttet til M16 (lys brun). Perioden der tettheten i AQT4, ut fra registreringer i produksjonsstyringssystemet, var over 25 kg/m³ er markert med blå bakgrunn.

5.2 Bedre produktkvalitet

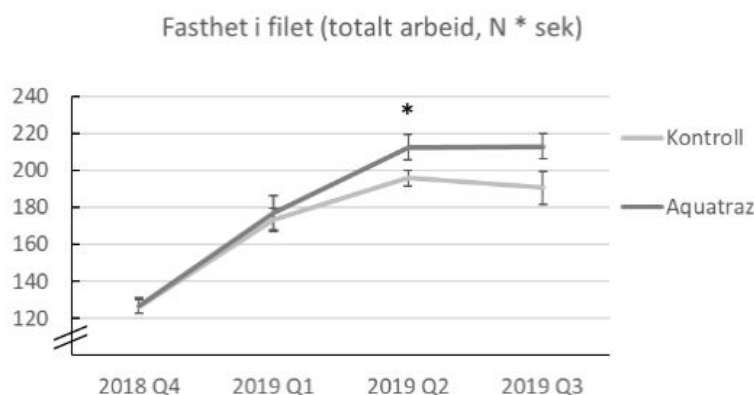
Suksesskriteriet produktkvalitet ble ikke definert for å øke forståelsen av helse eller velferd. Kriteriet ble derimot valgt fordi kvaliteten på ferdig produkt er svært sentralt for mottakelsen i markedet og oppnådd pris. Det er betydelig variasjon i kvalitet på ferdig produkt fra oppdrettslaks, og årsaker til dette kan være mange og komplekse. Imidlertid er det verdt å merke seg at det er funnet sammenheng mellom tekstur på filet og fiskens helsetilstand¹⁰, slik at god kvalitet også kan være en helseindikator.

Bedre produktkvalitet i form av fastere filet, på fisk fra naturlig strømsterke lokaliteter, var det sterke indikasjoner på før prosjektstart⁹. Ved å sette opp en sirkulær vannstrøm var hypotesen at dette dermed skulle gi tilsvarende kvalitetsresultater som for naturlig strømsterke lokaliteter.

Produktkvalitet ble målt på tilfeldige individer fra merden, men valgt ut slik at hvert individ ikke hadde større avvik enn $\pm 20\%$ av beregnet snittvekt i merden i produksjonsstyringssystemet på prøveuttakstidspunktet. I det tredje biologiprogrammet ble prøveuttakene samkjørt med uttak av prøver til gjellehelse og hjertehelse, mens det i de to første biologiprogrammene ble brukt ulike individer.

I det første biologiprogrammet ble det målt signifikant fastere filet på fisken fra

Aquatrazmerden i slutten av programmet, mens målingene var svært lik i de to gruppene i begynnelsen av programmet (figur 47). Det ble også observert bedre farge på fisken fra Aquatrazmerden.



Figur 47: Fasthet i filet målt i det første biologiprogrammet. Gjennomsnitt av to målinger per filet for det totale arbeidet som skulle til for å nå 90% av filettykkelsen.

På lokaliteten for det andre biologiprogrammet, ble det påvist pancreas disease (PD) på fisken. Denne virussykdommen gir blant annet muskelskader og kan ha påvirket kvaliteten på ferdig produkt. Fisken som sto i Aquatrazmerden fikk kliniske symptomer på et senere tidspunkt enn fisken som sto i kontrollmerden, dette kan ha påvirket resultatene i ugunstig retning for fisken i Aquatrazmerden. Målingene viste god fasthet i filet i begge de undersøkte gruppene, både fra Aquatrazmerd og kontrollmerd. Mot slutten av produksjonstida hadde fisken fra *Aquatraz* 3 lavere fettinnhold i muskulaturen, årsaken til dette er ukjent.

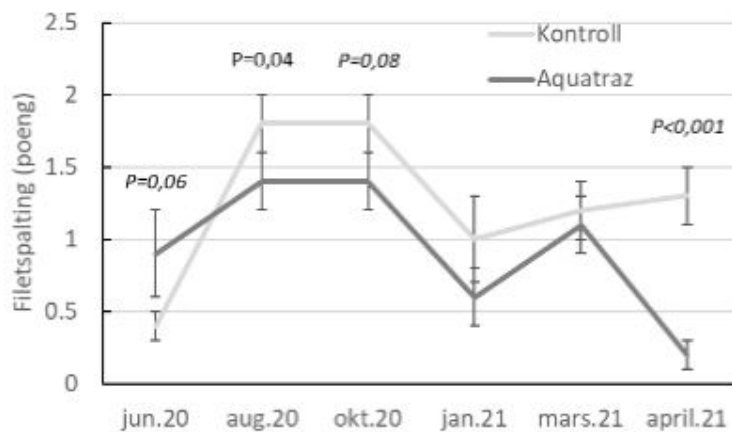
I det tredje biologiprogrammet var filetutbyttet høyere på fisken fra Aquatrazmerden på de tre siste uttakene. Filetfargen var gjennomgående høyere i Aquatrazfisken gjennom hele programmet, også ved oppstart, uten at det ble funnet faktorer som kunne forklare dette. Fettinnholdet i muskelen var generelt lignende for de to gruppene. Fisken i Aquatrazmerden hadde generelt lavere nivå av filetpalting (figur 48). For fasthet i filet var bildet uklart. Filetene til Aquatrazfisken hadde signifikant lavere bruddstyrke sammenlignet med KTR-fisken på to prøvuttak i midten av produksjonstida, men signifikant fastere muskel ved siste uttak, spesielt ved måling i den tykkeste delen av fileten.

I de tre biologiprogrammene hvor produktkvalitet ble vurdert er det flere funn som peker i retning av bedre kvalitet på fisk fra Aquatrazmerd enn det motsatte. Det er med andre ord ikke systematiske funn som peker tydelig i samme retning i hvert biologiprogram, men det er flere registreringer av bedre muskelkvalitet og bedre farge i Aquatrazmerdene.

5.3 Rømningssikker teknologi

Den kanskje viktigste årsaken til at konseptet Aquatraz ble utviklet allerede på 90-tallet var behovet for en mer rømningssikker merdteknologi. Aquatraz adresserer de viktigste årsakene til rømning. Disse er som oftest knyttet til skader på not, og da gjerne i de øvre vannmassene hvor Aquatraz er utrustet med et 8 meter dypt stålskjørt.

Skader som følge av eksterne laster fra bølger, vind, fartøyer og flytende objekter skjer



Figur 48: Filetspalting (poeng, 0-5) hos fisk sendt til kvalitetsanalyse i det tredje biologiprogrammet.

som oftest i de øvre 8 metrene. I bunn og sider er det også benyttet nøter i Aquatraz, men de står på dypt vann og er derfor mindre utsatt for ekstern påvirkning som gir skader. At Aquatraz er formstabil reduserer risikoen for skader ytterligere da nøtene holdes på plass og ikke kan bevege seg ut til sidene hvor det kan oppstå gnag mot fortøyningslinjer eller andre objekter. Skader på nøter oppstår også som følge av uheldige hendelser under nothåndtering.

Nøtene i sidevindue håndteres ikke i Aquatraz og bunnoten håndteres utelukkende med en intern vinsj med begrenset kraft og som har et fast innfestingspunkt i bunnen av nota. For å sikre at skader ikke skal oppstå på bunnota som følge av objekter som faller inn i merda er den utrustet med sparkelist rundt alle gangbaner og langs bro. For større komponenter som eksempelvis strømsettere er disse designet slik at de vil flyte om de sliter seg løs fra innfestningene.

For å sikre at det ikke kan oppstå rømning som følge av feiloperasjon av merden er alle oppdriftsvolumene permanent lukket og kan ikke fylles med vann uten at det oppstår punktering på stålstrukturen. Merden er videre designet for å tåle punktering av to flyteseksjoner uten at rømning kan oppstå.

Risikoanalyser utført for hver merdgenerasjon konkluderer med at teknologien er rømningssikker, noe som har åpnet opp for dispensasjon fra Fiskeridirektoratet til å øke antallet fisk til 400 000 individer i prosjektet.

5.4 HMS

Arbeid i oppdrettsnæringen er blant de farligste yrkene i Norge. Aquatraz ønsker å redusere faren for følgende ulykker:

- Fall til sjø
 - Stabil struktur med robuste rekkverk på begge sider av alle gangbaner

- Skader knyttet til kran- og løfteoperasjoner
 - Aquatraz er designet slik at behovet for kranoperasjoner reduseres, og der det er behov for løfteoperasjoner er det planlagt for at disse i stedet for bruk av eksterne fartøyer utføres med fastmontert utstyr ombord på merden. Dette gir sikrere løft hvor relativbevegelser mellom ekstern fartøy og merd elimineres.
- Slitasjeskader som følge av tunge arbeidsoperasjoner
 - Tunge arbeidsoperasjoner knyttet til nothåndtering er eliminert og brede gangbaner muliggjør bruk av traller for internt transport. Gode lagringsfasiliteter ombord reduseres også behovet for transport av utstyr frem og tilbake mellom merd og landbase
- Fall til sjø
 - Stabil struktur med robuste rekkverk på begge sider av alle gangbaner

I fremtiden vil oppdrett i likhet med de fleste andre næringer i større grad automatiseres. Den stive stålstrukturen tilrettelegger for slik utvikling og det er vårt mål at merden vil bidra til en mer industrialisert produksjon.

Både i primærnæringene og industrien har økt grad av automatisering forbedret både helse, miljø og sikkerhet. Denne utviklingstrenden har ikke vært fremtredende for oppdrett i sjø, men Aquatraz er velegnet for automatisering og vil forhåpentligvis endre trenden.

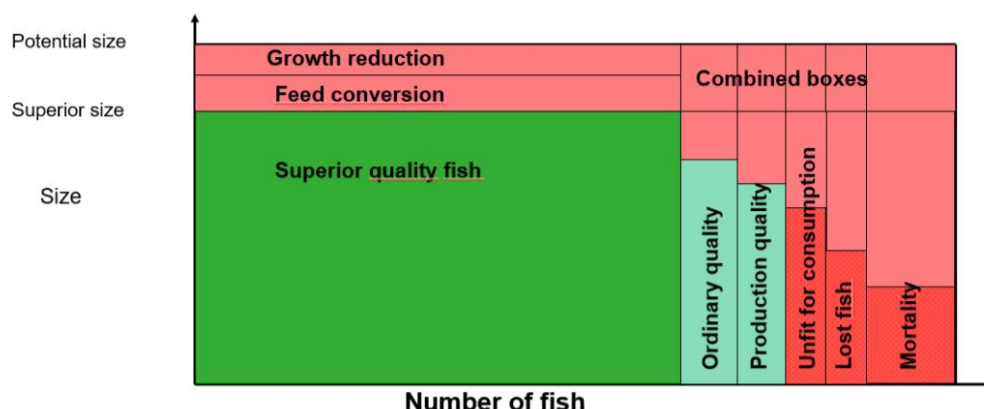
5.5 Høyere effektivitet/ økonomisk foretrukken teknologi

Formålet med utviklingstillatelsene er blant annet: «å legge til rette for utvikling av teknologi som kan bidra til å løse en eller flere av de miljø- og arealutfordringene som akvakulturnæringen står overfor». Dersom ny teknologi løser miljø- og/eller arealutfordringer uten at den også er kommersielt forsvarlig i ordinær produksjon er det usannsynlig at den i omfattende grad vil tas i bruk og dermed også lite sannsynlig at den vil bidra til å løse problemene næringen står ovenfor. Teknologien må derfor løse problemene uten å frata næringen konkurransekraften.

For å kunne ta mål av seg til å gjøre en betydelig forskjell for norsk akvakulturnæring ble det derfor også inkludert en kommersiell suksessindikator i prosjektet: Teknologien skal ha høyere effektivitet enn konvensjonell teknologi, og bli en økonomisk foretrukken teknologi.

Det er utført økonomiske case-studier med sammenlikning av produksjonen for hvert av de tre biologiprogrammene, og i tillegg en tilsvarende studie på Eiterfjorden for V20-generasjonen. «The biologic loss-production model»¹ (figur 49) ble brukt til å utføre sammenlikningene. Denne modellen kvantifiserer de ulike elementene i en biologisk produksjon og vurderer både biologiske og økonomiske parametere. Resultatene i slike case-studier vil være beheftet med usikkerhet da det kun er én testmerd og én kontrollmerd i hvert studie, og de er også påvirket av driftsmessige valg. Sikkerheten i resultatene øker

imidlertid ved repetisjoner av liknende studier, og utviklingsprosjektet har gitt interessante resultater som har en tydelig retning.



Figur 49: «The Biologic Production-Loss Model» (bPLM) som kan kvantifisere produsert biomasse, kvalitet og utnyttelse av et biologisk potensial i en fiskeproduksjon¹

I det første biologiprogrammet ble det brukt en «partial budget model», som summerer opp kostnadene og de spesifikke produksjonsmessige fordelene og ulempene ved bruk av Aquatraz sammenlignet med konvensjonell merdteknologi. I en slik modell indentifiseres de sentrale faktorene som er forskjellige mellom de to teknologiene, mens de øvrige produksjonsparametere og kostnader ligger faste.

I dette første programmet var antallet fisk i Aquatrazmerd og kontrollmerd ulikt slik at tettheten av fisk ble på et sammenlignbart nivå. Totalresultatet ble vurdert til å være for usikkert og ble utelatt i sluttrapporten for biologiprogrammet. De biologiske effektene ble beregnet til å redusere prodkost med 1,36 kr/kg for Aquatrazmerden. Investeringseffektene ble beregnet til å øke prodkost med 3,50 kr/kg. Programmet ga altså indikasjoner på at det var mulig å oppnå bedre biologiske resultater i Aquatrazmerden, men at teknologien/driften måtte forbedres ytterligere for å forsvare den høyere investeringskostnaden.

Skalafordel er en måte å forbedre effektiviteten på, og for Aquatrazprosjektet var det å utvikle en teknologi som kunne forsvare et høyere antall fisk per enhet samt høyere fisketetthet enn dagens regelverk tillater et naturlig delmål. De første skrittene i den retning ble prøvd ut på Kyrøyene i det andre biologiprogrammet og på flere andre Aquatrazmerder i et eget tetthetsprogram.

I dette andre biologiprogrammet ble det benyttet en mer detaljert «full modell» som inkluderer investeringseffekter, biologieffekter, driftskostnader og lønn. Prodkost i Aquatrazmerden ble beregnet til 36,46 kr/kg, mens prodkost i kontrollmerden var kalibrert til et snitt for Trøndelag på 38,76 kr/kg, altså 2,30 kr/kg lavere prodkost i Aquatrazmerden. Produksjonen i Aquatrazmerden pågikk lenger utover sommeren, og det ble et betydelig innslag av kjønnsmodning i denne merden. Dette påvirket klassifiseringen ved slakt og ga lavere pris, noe som igjen førte til at margin ble beregnet til 16,63 kr/kg i Aquatrazmerden og 19,24 kr/kg i kontrollmerden. Altså ble marginen beregnet til å være 2,61 kr/kg bedre i kontrollmerden. Det kan imidlertid kommenteres at innslag av kjønnsmodning ikke kunne relateres til teknologien.

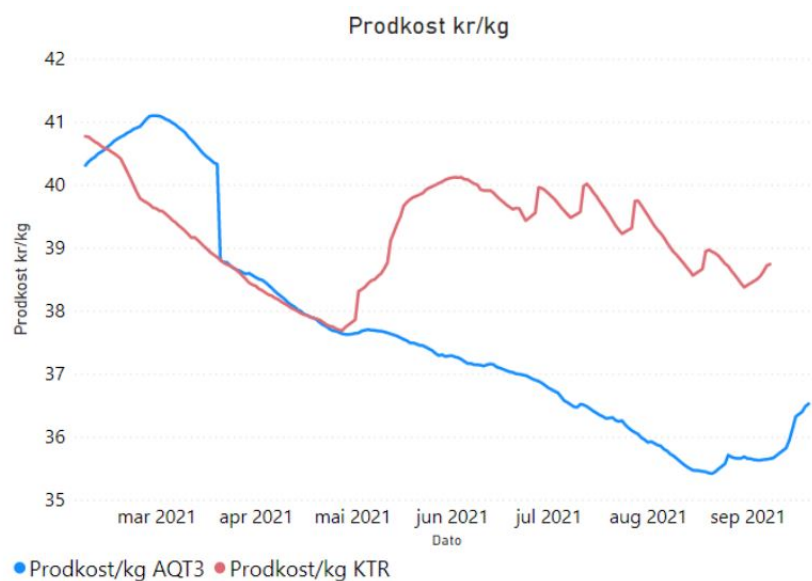
Effekten av høyere tetthet/antall fisk ga betydelig bidrag til lavere prodkost i Aquatrazmerden. Likeledes var direkte lusekostnader 3,00 kr/kg lavere i Aquatrazmerden og betydde dermed også mye for oppnådd prodkost.

Det tredje biologiprogrammet benyttet også en «full modell», og det var en skalafordel for Aquatrazmerden i form av antall og fisketetthet. Prodkost i kontrollmerd var kalibrert til et snitt for Trøndelag på 38,78 kr/kg, og Aquatrazmerden kom ut med en beregnet prodkost på 36,96 kr/kg. Altså var beregnet prodkost 1,82 kr/kg lavere i Aquatrazmerden. Her var også oppnådd pris 1,40 kr/kg høyere i Aquatrazmerden, hovedsaklig på grunn av høyere slaktevekt som igjen var mulig grunnet kontroll med lus og få håndteringer. Det ga margin på 19,87 kr/kg i Aquatrazmerden og 16,65 kr/kg i kontrollmerden.

En nåverdiberegning basert på 3,15% rente, 15 års levetid og ingen restverdi viste at et årlig forbedret resultat på 7,69 millioner kr ville forsvare en økt investeringskostnad på 90.9 millioner kr.

Det er også gjort sammenlikning av en Aquatrazmerd og en kontrollmerd i siste del av produksjonen på V20-generasjonen på Eiterfjorden². Denne produksjonen var ikke en del av biologiprogrammene, men den var særlig interessant som case-studie da den ble gjennomført uten forstyrrende flyttinger eller splittinger og som følge av at antallet fisk var tilsvarende som for konvensjonelle merder. Resultater fra produksjonen ville derfor kunne si noe om hvordan Aquatraz presterte uten dispensasjon på antall individer og maksimal tetthet. Metodikken som ble brukt var videreutviklet fra den som var benyttet i biologiprogrammene.

Prodkost i kontrollmerden var kalibrert til snitt for Trøndelag på 38,78 kr/kg, og Aquatrazmerden kom ut med prodkost på 36,47 kr/kg (figur 50). Det ble også oppnådd bedre pris på fisken fra Aquatrazmerden, et vesentlig element til å oppnå dette var at man kunne optimalisere slaktetidspunktet her mens lusesituasjonen påvirket slaktetidspunktet for kontrollmerden.

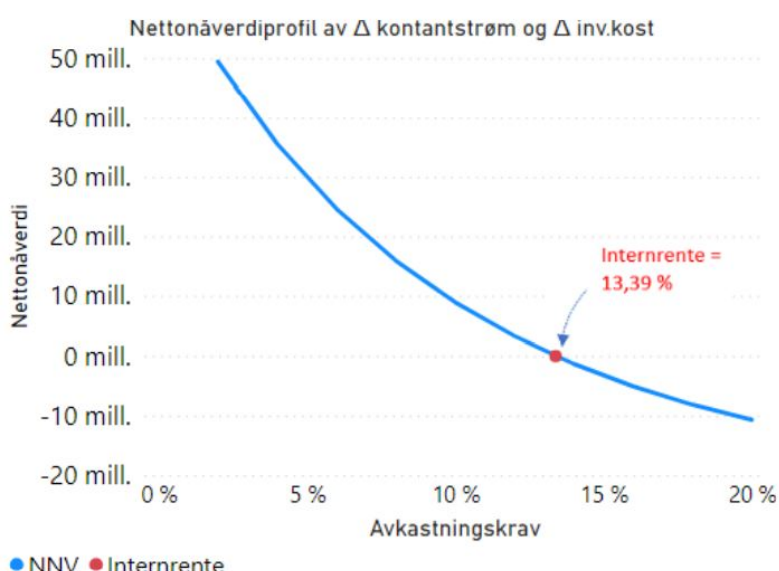


Figur 50: Utvikling i prodkost i produksjonsperioden i Eiterfjorden. Aquatrazmerd i blå og kontrollmerd i rød.

Margin ble beregnet til 19,92 kr/kg for Aquatrazmerden og 15,87 kr/kg for kontrollmerden. Dødelighet og vektutvikling ble pekt på som viktige faktorer som bidro til bedre resultat for Aquatrazmerden. En avlusing i kontrollmerden medførte unormalt mye skader og ga et betydelig bidrag til dødeligheten. Dette kan ses i relasjon til en ny trengemetode som ble prøvd ut, men kan også ses på som en påminnelse om risiko for uhell ved håndtering. I denne produksjonen ble ikke fisken i Aquatrazmerden avluset eller håndtert fra den ble flyttet inn i merden til den ble slaktet, og lusekostnadene var null.

Nettonåverdiprofil viste en beregnet internrente på 13,39 % på merinvesteringer (figur 51). Nåverdiberegning med samme forutsetninger som ble brukt på tilsvarende beregning i det tredje biologiprogrammet viste 7,73 millioner kroner i årlig forbedret kontantstrøm, noe som kunne forsvare en økt investeringskostnad på 91,33 millioner kroner.

I sum viser de gjennomførte case-studiene en klar tendens til lavere produksjonskostnader og bedre marginer som følge av bedre biologiske resultater, klart lavere lusekostnader, skalafordeler og muligheten til å optimalisere slaktetidspunkt uavhengig av lusesituasjonen. Det er også en trend at resultatene har blitt bedre mot slutten av utviklingsprosjektet, noe som kan tilskrives forbedringer både i teknologi og drift av merdene.



Figur 51: Nettonåverdiprofil case i Eiterfjorden 2021. Beregningene er framskriving av Δ kontantstrøm per år og 49 mill. Δ investering i teknologi, gitt en avskrivningstid på 15 år og restverdi på null. Internrenten er der grafen for nettonåverdi krysser X-aksen hvor $Y = 0$.

6 Semi-lukket merdteknologi - læring fra prosjektet

Gjennom prosjektet er ny kunnskap og erfaringer tilgjengeliggjort i rapporter som er publisert fortløpende på Fiskeridirektoratets sider, men den kanskje viktigste formidlingen har kommet som følge av å involvere eksterne i prosjektet. Slik har kunnskapen «fått bein å gå på», og vil benyttes videre innenfor de respektive fagområdene. I dette kapitlet presenteres hva prosjektet anser som de viktigste læringspunktene fra prosjektet innen teknologi og biologi.

6.1 Teknologi

Læring innen den tekniske disiplinen er i dette kapitlet begrenset til beregningsmetodikk, måleteknologi, forsøksgjennomføring og materialvalg inkludert overflatebeskyttelse. Tekniske løsninger og prosjektgjennomføring er utelatt i dette kapitlet da det er dekket i kapittel 3. Videre har det vært nødvendig å utelate deler av den tekniske læringen for å sikre Seafarming Systems posisjon i markedet etter at prosjektet er avsluttet.

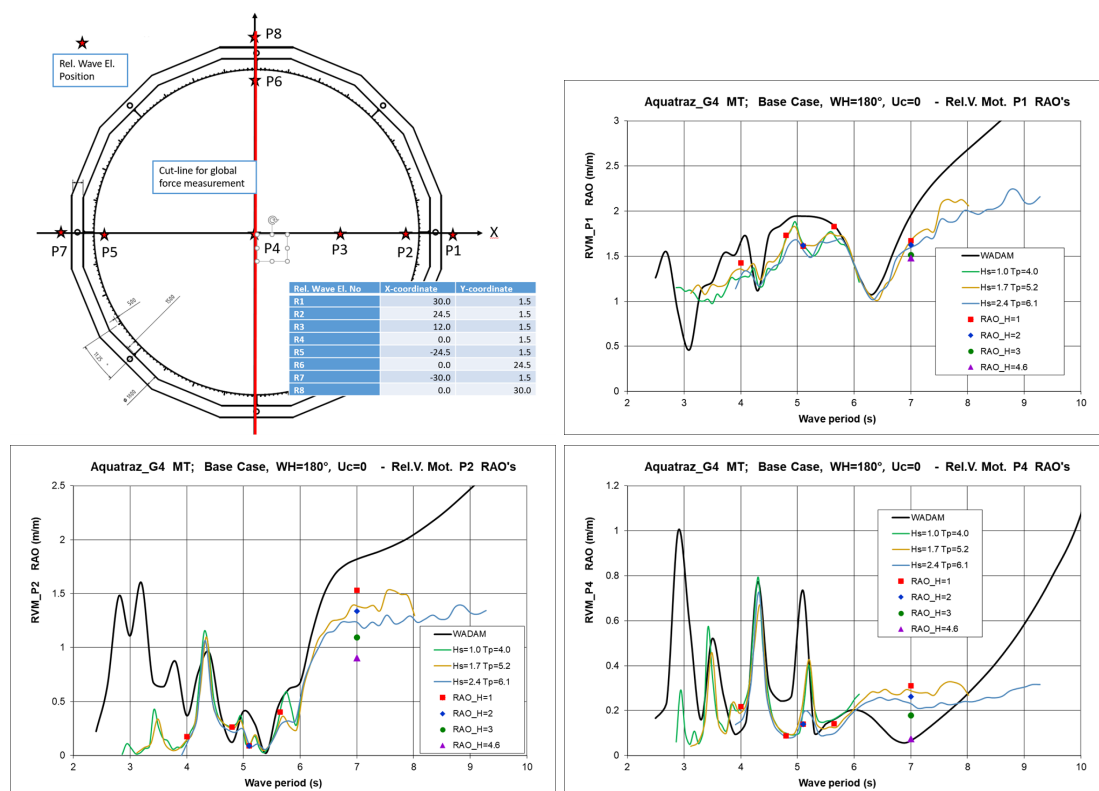
6.1.1 Beregningsmetodikk for struktur

I løpet av Aquatrazprosjektet er beregningsmetodikken som benyttes til å finne lastene som virker på strukturen videreutviklet og blitt både raskere og mer presise. Det er også etablert nye metoder for å overføre lastene til strukturmodellen inkludert håndtering av ikke-lineariteter i forbindelse med struktur i og over vannlinjen. Samlet medfører dette at hver designiterasjon kan gjennomføres på mindre tid og at resultatene blir mer presise. Dette gir i neste omgang en mer optimalisert struktur som er robust, sikker og kostnadseffektiv.

Hydrodynamiske lastberegninger for Aquatraz er i hovedsak basert på konvensjonell lineær frekvensplan analyse. Ikke-lineære drag laster på struktur og nøter er linearisert basert på aktuelle bølgekondisjoner. Hovedantagelsen for dette er at Aquatrazdesignet kan betraktes som tilstrekkelig stift til at elastiske deformasjoner er uvesentlige, noe som er dokumentert gjennom fullskalatester i prosjektet.

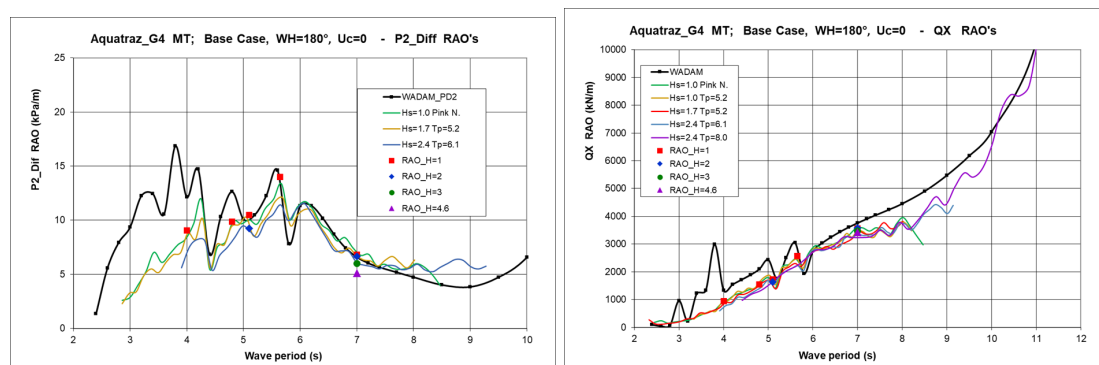
De viktigste utfordringene ved hydrodynamiske beregningene av Aquatrazdesignet er ikke-lineære effekter for bølgelaster på flyteringen i overflaten, delvis neddykking av gangbane, effekt av bølge-strøm interaksjon samt dynamisk effekt av vannet inne i merden. Drivende hydrodynamisk kraft på merdvegg er differansetrykket mellom indre og ytre trykk, og dette vil derfor kunne bli sterkt påvirket av effekt av sloshing inne i merd. For verifisering av anvendt metodikk i hydrodynamiske beregninger er det derfor gjennomført to sett med omfattende modellforsøk i havbasseng med realistisk modellering av merdstruktur og nøter, bølger, strøm og forankring.

Gjennom testene ble det dokumentert at den anvendte beregningsmetoden generelt gir en realistisk representasjon av hydrodynamiske laster. Resultater for beregnet og målt overflateheving inne i og utenfor merd er vist i figur 52. Det fremgår at beregninger overvurderer sloshing respons for de lavest periodene ($T < 3-4$ s) mens for høyere perioder er overensstemmelsen rimelig god.



Figur 52: Beregnet og målt overflateheving inne i og utenfor merd

Dette gjenspeiler seg også på trykkdifferensen mellom ytre og indre trykk målt på merdvegg vist i figur 53 (venstre). Generelt var erfaringen fra testene at sloshing inne i merd er en mindre utfordring enn forventet, noe som også er dokumentert i fullskalamålinger av merden.



Figur 53: Trykkdifferanse mellom indre og ytre trykk

Også for globale laster i et vertikalt snitt gjennom senter av merden viste beregningene god overensstemmelse med modellforsøksresultater som vist i figur 53 (høyre) (for total horisontal kraft gjennom snittet). Totalt sett verifiserte sammenligningene mellom modellforsøk og beregninger den anvendte beregningsmetoden for bruk av laster fra bølger og strøm som input til strukturanalyser.

En viktig læring fra prosjektet er at hydrodynamiske og strukturelle betraktninger bør gjøres i tett samarbeid. En global og detaljert strukturmodell ble tidlig utviklet slik at gode metoder for å vurdere globale respons ble utviklet. Modellen ga også bedre forståelse for hvilke laster og områder som var kritiske. Gjennom flere iterasjoner ble dette samspillet optimalisert og verktøy utviklet for effektiv lastpåsetting slik at kritiske områder ble identifisert og designet forbedret.

Et nøkkelaspekt ved Aquatrazmerden er det åpne sylindriske skallet som er utsatt for hydrodynamiske trykk både på inn og utside av skall. For å sikre et godt design var det viktig å forstå hvilke laster/trykk merden er utsatt for. Det viste seg at forståelse for global hydrodynamisk trykkfordeling (øyeblikksbilde av samtidighet) i både vertikal og horisontal retning var vel så viktig som å finne det maksimale lokale trykket på et gitt lokalt punkt. Beregningsmetoden som ble utviklet ble anvendt for alle relevante operasjonskondisjoner inkludert operasjon i neddykket posisjon, løfting, avlást i hevet posisjon samt sleping/transport.

Den globale strukturmodellen for hver av merdgenerasjonene er benyttet gjennom hele prosjektet og fortløpende holdt oppdatert. Modellen var i startfasen relativt grov for bruk til optimalisering samt utvikling av generelt strukturarrangement. Etter hvert ble modellen utviklet og detaljert ut slik at alle viktige og kritiske detaljer var nøyaktig gjengitt i modell. Med dagens maskinkapasitet er dette mulig og anses å være fordelaktig da effekt av endringer i last eller struktur kan sjekkes på hele merden ved å kjøre en ny analyse. Ved å sikre at analysemodellen til enhver tid gjenspeiler designet som bygget, kan modellen brukes som et hjelpemiddel i driftsfasen for vurdering av skader og eventuelle endringer/ombygginger.

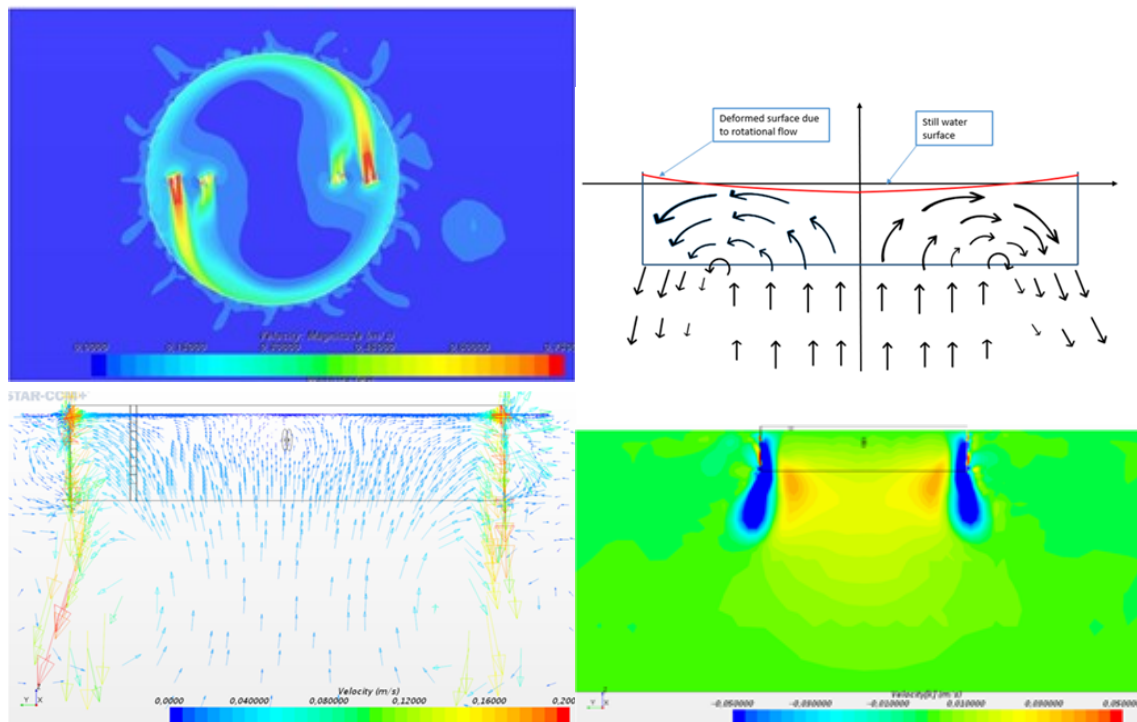
For at Aquatraz skal bli en suksess er det viktig at den i tillegg til å bedre fiskevelferd og redusere luseproblematikk at den har så lav kost som mulig. For en stålmerd er kostnaden i stor grad gitt av vekt og kompleksitet. Ved utvikling av struktur design ble det derfor lagt stor vekt på å velge vektoptimale løsninger samt holde kompleksiteten nede ved å velge kjente detaljer fra skipsdesign.

Et viktig aspekt for Aquatrazkonseptet er det indre merdskallet kan løftes ut av vann. For å redusere løftekraft er det indre skallet utstyrt med flytelement i nedre del av skall og det er teoretisk mulig å ha en tilnærmet nøytral vekt i vann (vekt og oppdrift balanserer). Med en total vekt på 550 – 650 tonn og tilsvarende oppdrift er det imidlertid ikke mye avvik på enten vekt eller oppdrift som skal til for at det kan bli problemer. På grunn av dette var det veldig stor fokus på vektkontroll gjennom hele prosjektet og designet laget slik at størrelse på flytekammer kunne justeres langt ut i detaljeringsfasen og til og med etter at enkelte struktureksjoner var veid.

6.1.2 Vannstrøm i merd

Vanndynamikk i semilukkede merdsystemer som Aquatraz er komplisert og læringskurven har vært bratt gjennom hele prosjektet innen alt fra målemetoder, beregningsmetodikk til analyser av både forsøks- og fullskalaresultater. Dette medfører at vi i dag har en langt bedre forståelse av vanndynamikken i systemet, faktorene som påvirker den og hvordan den kan beregnes selv om det fortsatt gjenstår mye arbeid på feltet.

Vannstrøm inne i- og vannutskiftning i merd er avgjørende for tilvekst og fiskevelferd generelt. Gjennom prosjektet ble det tidlig dokumentert at bruk av horisontale strømsettere for generering av sirkulasjon i merd er en meget effektiv metode for å skape vannutskiftning. Sirkulasjonen gir en deformasjon av fri overflate (pga. sentripetal akselerasjon) som igjen genererer en vertikal strømning i merd som vist i figur 54. Dette har vist seg å være en svært energieffektiv måte for å skape vannutskiftning, hvor det fraktes i størrelsesorden 50 m³/s vann med 20kW effekt.



Figur 54: Strømningsbilde i merd

Strømningsbildet inne i og rundt merd er komplekst. Erfaringene gjennom prosjektet har vist at CFD er en velegnet og effektiv metode for å kartlegge dette og omfattende fullskallatester har verifisert kvaliteten av disse beregningene. CFD analyser er derfor systematisk benyttet for alle faser av utvikling og optimalisering av løsninger både for strømsettere og for selve merd designet. Som del av prosjektet er det både utviklet nye måter å benytte programvaren på og hvordan de svært store datamengdene kan presenteres på en effektiv og forståelig måte.

6.1.3 Måleteknologi og prosedyrer

Det er gjennom prosjektet gjennomført et omfattende fullskala måleprogram. Dette omfatter følgende;

- Strukturmålinger som omfatter registreringer av bevegelser, akselerasjoner og spenninger i kritiske punkt for struktur. Målinger er gjennomført i to perioder.
- Vannstrømsmålinger i og rundt merd for kartlegging av sirkulasjon, vannutskifting i merd samt hvor vannet inn i merd hentes fra. Tre ulike oppsett og måleprogram er

gjennomført.

Det er avgjørende å ha kontroll på de viktigste parameterne som kan påvirke målresultatene. For måling av strukturens respons er kartlegging av strømhastighet og bølgedata inkludert retning for begge, avgjørende. For vannstrømsmålinger i merd er kontroll på hastighet og retning for innkommende strøm og dybdeavhengig fordeling av salinitet, tetthet og O₂ for innstrømmende vann og inne i merd helt avgjørende. Vannstrøm i merd er også sterkt påvirket av biomasse og fiskens adferd og selvsagt av pådrag på strømsettere. Disse parameterne må også loggføres gjennom hele måleperioden.

Strukturmålinger krever grundig planlegging og analyser i forkant for å definere de mest relevante og velegnede målepunkt, samt utarbeidelse av plan for analyser i etterkant av målingene. Testperiodene strakte seg gjennom to vintersesonger. Dette ga tilstrekkelig med måldata for ulike sjøtilstander og bølgeretninger til å gi et godt bilde på merdens faktiske belastninger samt gi gode data til bruk for etterregning/kontroll.

Vannstrømmålinger i merd er komplisert da strømmingen kontinuerlig endres i rom og tid, delvis pga. hvirveldannelser i merd og delvis fra endringer i ytre påvirkning. Variasjonene dekker et bredt frekvensbånd og det er derfor krevende å få oversikt over det dominerende strømningsbildet i merd. Kontinuerlige hastighetsmålinger (3 retninger, Vektor) i definerte punkt i merd gir viktige data, men er avhengig av at tilstrekkelig antall punkt er dekket og krever grundige analyser i etterkant for å få ut oversikt over den totale strømmingen. Visualisering av strømming viste seg å være et svært nyttig hjelpemiddel. Dette ble gjennomført i overflaten og nede i merd. Det ble benyttet tilsetningsstoff med farge som slippes ut i konsentrerte punktutslipp. Hastighet og retning kartlegges da ved visuell observasjon av bevegelsen. For strømming i overflaten ble drone i stasjonær posisjon over merden benyttet. For utslipp nede i merd ble flyttbart 3-D kamera benyttet. Dette fungerte meget bra, men er tidkrevende. Ulike tilsetningsstoff er prøvd ut, inkludert fluorisenes (Uranine AP) og fløte. Erfaringene viste at fløte fungert klart best da fløte gav en mer langsom utblanding i vannmassene og derved klarere kontrast og enklere å følge.

6.1.4 Erfaring fra gjennomføring av forsøk og logging av data

Ved gjennomføring av forsøk er det fundamentalt å sikre at data lagres slik at de kan benyttes til senere analyser. Dette krever at det på forhånd klargjøres hvordan forsøket skal gjennomføres og at det etableres en prosedyre som følges. På tross av at de fleste involverte i prosjektet er svært godt kjent med det faktum, er det en erkjennelse at den største utfordringen har vært å lykkes med dette.

Prosjektet har utarbeidet gode online verktøy for logging, planlagt forsøkene på forhånd og etablert protokoller. I ettertid har det på tross av dette ofte oppstått usikkerhet rundt andre relevante forhold. Eksempelvis – hvor mange strømsettere gikk og hvilken effekt på et gitt tidspunkt, eller hvordan var vindforholdene og var biomassen stresset? Prosjektet kan ikke vise til nye metoder eller verktøy som sikrer at forsøkene i fortsettelsen vil fungere utmerket, men alle involverte har fått større respekt for viktigheten av å fortløpende logge absolutt alle operasjoner og i større grad også registrere eksterne forhold som kan ha innvirkning på systemet som testes.

6.1.5 Maling, bunnstoff og materialvalg

For en flytende stålstruktur som Aquatraz er valg av materialer og malingsystem veldig viktig og avgjørende for levetid og vedlikeholdskostnader. Prosjektteamet har erfaring fra skip og offshore og har anvendt denne kunnskapen i prosjektet. Malingsystemet som er benyttet er et høykvalitetssystem med garantert levetid ved riktig påføring. Det har høyere nybyggpris, men gir potensielt store besparelser i drift. Det er imidlertid svært viktig at det påføres korrekt og prosjektet leide inn ekspertise fra malingsleverandøren Jotun for å etablere malingsspesifikasjon og for å følge opp at denne ble fulgt.

I tillegg til selve malingen er valg av detaljer viktig for levetid og effektiv beskyttelse. Utvikling av strukturdesignet tok høyde for dette ved å ha mest mulig glatte flater, unngå skarpe kanter, valg av stivere profil samt unngå områder hvor det kan oppstå oppsamling av smuss. Der hvor skarpe kanter var unngåelig ble disse slipt og malt med ekstra strøk maling «stripe-coating».

Et malingsystems levetid vil forbedres ved å sørge for katodisk beskyttelse av stålet. Merdene er derfor utstyrt med aluminiumsbaserte offeranoder med antall og fordeling bestemt/optimalisert gjennom egne simuleringer.

Aquatrazmerdene er bygget i høyfast karbonstål med flytegrense på 355 MPa. Ved kontroll på utmatting gir et slik høyfast materiale den laveste byggeprisen siden vekten reduseres mer en enhetskostprisen øker for selve stålet.

6.2 Erfaringer fra driftsorganisasjonen

All bruk av nytt utstyr og ny teknologi krever tilpasninger av arbeidsmetoder og prosedyrer. Perioden fra teknologien tas i bruk til arbeidsmetoden er innarbeidet innebærer ofte en bratt læringskurve før man er komfortabel med den nye arbeidshverdagen. Aquatraz er ingen unntak her. Selv om teknologien har gitt røkterne betydelig mindre arbeid i form av mindre avlusning og ingen bruk av rensefisk representerer merden noe nytt og ukjent for de som har jobbet med den. Dette kan føre til at det foretrekkes å benytte kjente metoder med de ulempene det medfører fremfor å ta i bruk ny ukjent teknologi. Denne holdningen har endret seg etter hvert som operatørene har blitt mer komfortable og bedre kjente med de nye arbeidsoperasjonene.

Med hensyn til HMS har Aquatraz flere fordeler sammenlignet med konvensjonelle merder. Den stabile stålplattformen og de brede gangbanene med rekkverk på begge sider gir en stabil og god arbeidsplass (figur 55).

Merdene er utstyrt med faste kaier med god fending og solide fortøyningspunkt som gir en sikrere entring av merden. Gangbrua som går på tvers over merden, gir gode muligheter til å observere fisk og fastslå status i merd. Gangbrua er også dimensjonert slik at man har mulighet til å montere det man ønsker av utstyr for å optimalisere driften.



Figur 55: Aquatraz 4 i Årsetfjorden

6.3 Biologi

Suksesskriteriene la opp til at prosjektet skulle framskaffe kunnskap for flere sentrale biologiske faktorer, men prosjektet har også generert kunnskap utover disse og det er valgt å ta med noen av disse i denne rapporten.

6.3.1 Tilvekst på dagnivå, dødelighet og oksygen

Vannets oksygennivå er svært viktig for god velferd og god tilvekst hos laks, og er oftest den vannkjemiske faktoren man først får negative utslag på idet man begynner å skjerme/lukke volumet som er tilgjengelig for oppdrettsfisk eller man begrenser vanngjennomstrømmingen. Ved økende vanntemperatur reduseres vannets evne til å holde på oksygen, altså er vannets absolutte konsentrasjon av oksygen (mg/l) lavere ved høy vanntemperatur og 100 % oksygenmetning enn ved kaldt vann med 100 % oksygenmetning. Fiskens oksygenforbruk følger en motsatt kurve da den metabolske aktiviteten øker ved økende temperatur og dermed også gir økt oksygenforbruk. Den metabolske marginen blir derfor mindre ved høyere temperatur.

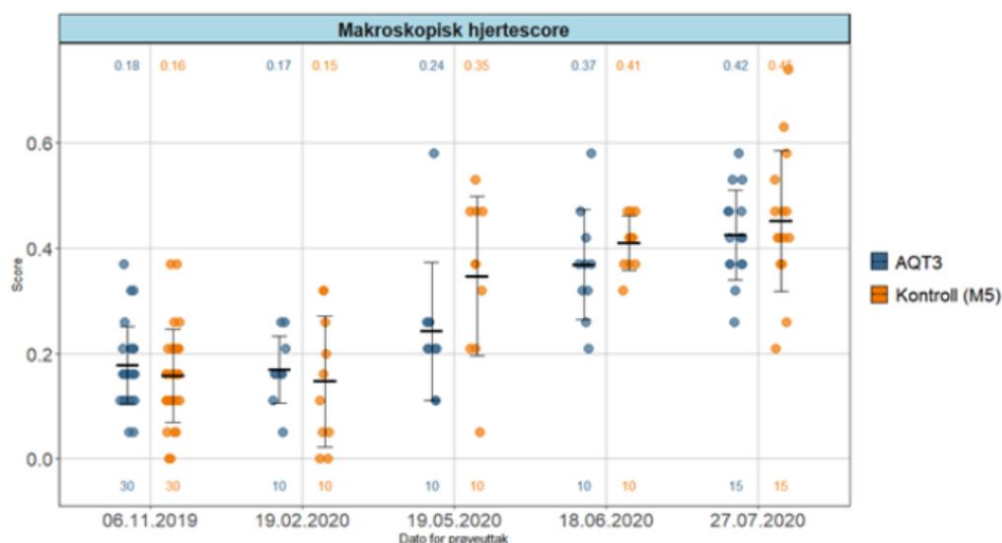
Etablert kunnskap om grenseverdi for oksygenmetning relatert til produksjon og velferd, er i stor grad basert på forsøk utført under kontrollerte betingelser, se for eksempel¹⁷ og¹⁶. Det er begrenset med studier fra ulike driftssituasjoner i sjø.

I regi av Aquatrazprosjektet ble det samlet inn data fra produksjonsstyringssystemet, miljømålinger og andre relevante kilder for biologiprogram 1 og 2. Disse ble analysert statistisk for å se etter faktorer som påvirker tilvekst (målt som VF3) og dødelighet på dagnivå. Multivariabel lineær regresjon ble brukt som metode og det ble funnet flere interessante sammenhenger (upublisert). Datasettet fra det første biologiprogrammet inneholdt mindre støy og ga flere sammenhenger enn materialet fra det andre biologiprogrammet. Oksygennivået hadde eksempelvis en klar innvirkning på tilvekst i det første programmet, men denne effekten ble ikke funnet igjen i det andre programmet hvor oksygennivået generelt sett var høyere. Der det ble funnet sammenheng var innslagspunktet for redusert tilveksthastighet ved et høyere oksygenmetningsnivå enn tilgjengelig litteratur viser. Fisketetthet ble analysert opp til 26 kg/m³ og det ble ikke funnet noen reduksjon i tilveksthastighet målt som VF3 på dagnivå som følge av den økte tettheten. Dette samsvarer med funn i tetthetsprogrammene, hvor det ikke ble funnet sammenheng mellom økende tetthet og nedgang i tilveksthastighet i Aquatrazmerdene. Disse resultatene skiller seg fra erfaringer med konvensjonelle merder hvor tilveksten normalt er avtagende når tettheten når 20-25 kg/m³. Analysene i prosjektet ga interessante resultater og det antas at videreutvikling av statistiske verktøy kan bidra til ny og relevant kunnskap om hvilke faktorer og i hvilken grad de påvirker tilvekst og dødelighet. Når dette er kjent kan tiltakene for å forbedre produksjonen settes inn der de gir mest effekt.

6.3.2 Hjertescore

I løpet av de tre første biologiprogrammene ble det til sammen tatt ut hjerte fra over 350 tilfeldige individer fra Aquatrazmerder og kontrollmerder. Disse ble vurdert både makroskopisk og histologisk. Et scoringssystem for hjerter har vært under utvikling i

perioden prosjektet har pågått, og det er levert betydelige bidrag til utvikling av slikt systemet undervegs fra prøveuttakene. Det er Alf Dalum som har vært sentral i utviklingen av dette scoringssystemet (figur 56).



Figur 56: Grafisk framstilling av makroskopisk hjertescore/ grad av morfologisk avvik fra idealfasong, data fra det andre biologiprogrammet på Kyrøyene.

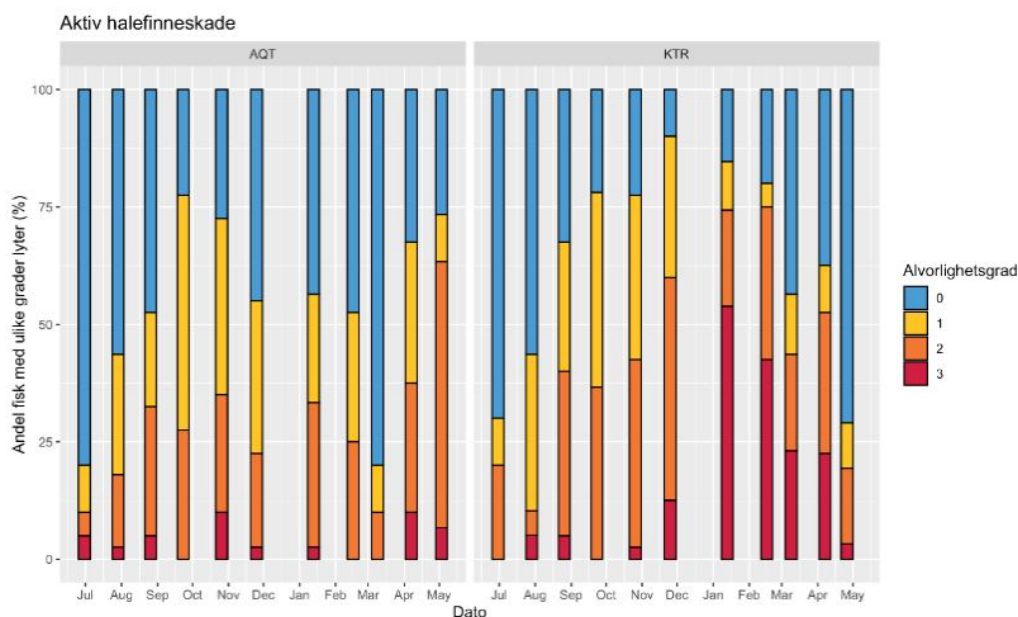
6.3.3 Velferdsscore

I de tre første biologiprogrammene ble det så godt som uten unntak utført månedlige velferdsscoringer av minst 40 fisker i Aquatraxmerd og kontrollmerd, samt at det i tillegg ble utført noen velferdsscoringer i forbindelse med tetthetsprogrammet på Kyrøyene. Hvert individ ble veid og målt, samt at det ble scoret 17 operative velferdsindikatorer etter Fishwell-standarden¹³. Til sammen betyr dette at de samme indikatorene er scoret av samme person og etter samme standard på minst 2.300 individer.

En tradisjonell tilnærming med feltskjema og overføring til database ville medført betydelig arbeidstid med manuell registrering. Det ble derfor i samarbeid med en leverandør utviklet en mobilapp for dette. Appen er fortløpende utviklet gjennom prosjektets varighet, og har muliggjort enkel og trygg håndtering av mer enn 43 000 datapunkter. Metodikken for bearbeiding av data ble betydelig forbedret i det tredje biologiprogrammet.

Resultatene fra velferdsscoringene (eksempel i figur 57) er presentert i rapportene fra biologiprogrammene. Hovedfunnene var at det ikke ble funnet systematiske forskjeller på velferdsindikatorer mellom merdsystemene, og at noen viktige velferdsindikatorer hadde betydelige utslag etter håndtering/avlusing. Det siste funnet støtter opp under viktigheten av suksesskriteriet om å unngå avlusing fra utsett til slakt. Videre var det ingen indikasjoner på negative utslag på velferdsindikatorer for de høyeste fisketetthetene.

Av resultatene framgår det også hvilke indikatorer som har utmerket seg som best for å evaluere påvirkning fra håndtering eller se på velferdssituasjonen fram mot slaktetidspunktet. Det er mulig å gå videre inn i dette datasettet og gjøre ytterligere undersøkelser på et senere tidspunkt om det er relevant.

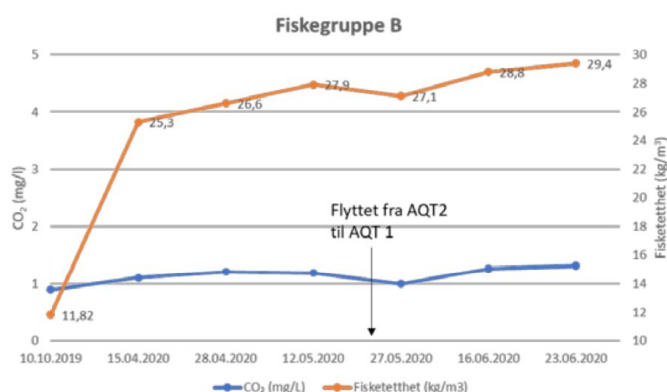


Figur 57: Andel fisk (%) med ulike score-verdier for aktiv halefinneskade på fisk fra *Aquatrax 4* (AQT4) og kontrollmerd (KTR) på alle undersøkelsesdatoer i det tredje biologiprogrammet.

6.3.4 Vannkvalitet

Mange fasetter innen temaet vannkvalitet er målt og vurdert i prosjektet, og det er flere gjennomgående funn i prosjektets varighet.

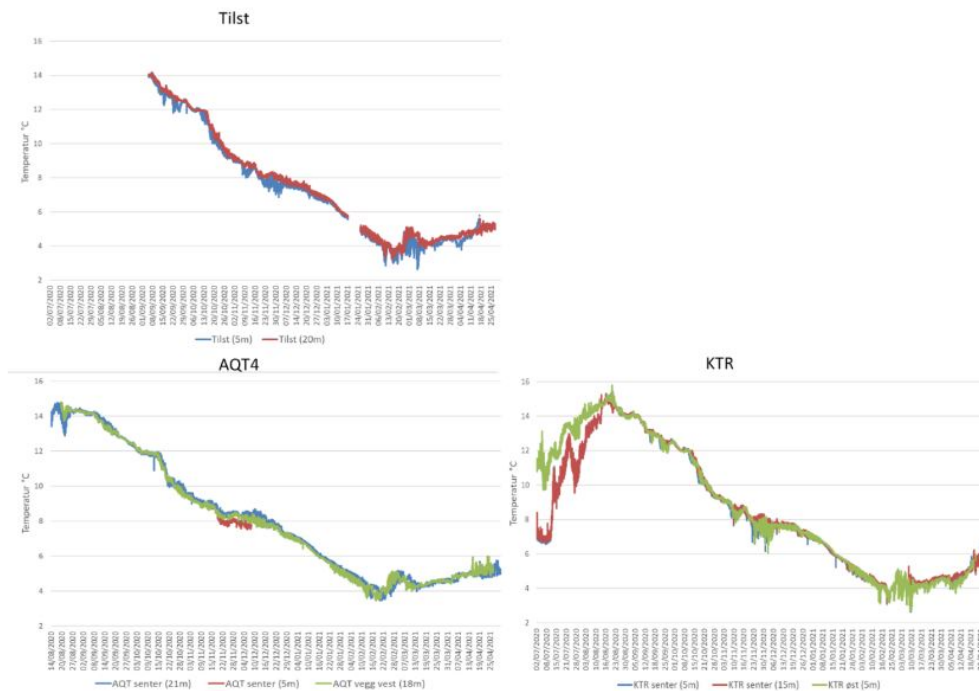
Metabolitter som CO₂ og total ammonium nitrogen (TAN) eller målinger av turbiditet, totalt organisk karbon (TOC) eller totalt suspendert stoff (TSS) har ikke hatt forhøyede verdier i Aquatraxmerden. Dette gjelder også for periodene med høyest fisketetthet, der det har vært dispensasjon til høyere tetthet enn regelverkskravet på 25 kg/m³. Den høyeste tettheten i prosjektperioden har vært på ca. 30 kg/m³ (figur 58).



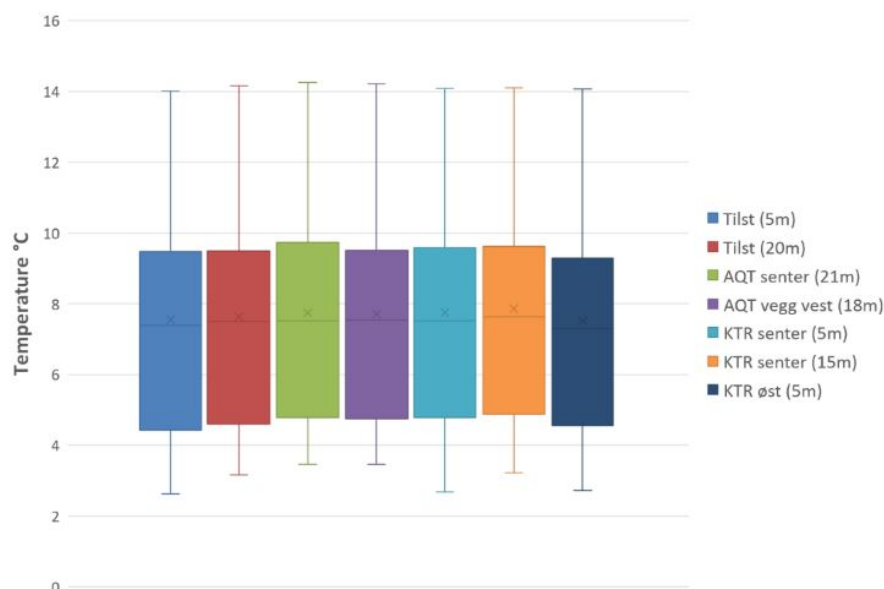
Figur 58: Konsentrasjonen av fritt CO₂ (mg/L; blå linje) for fiskegruppe B i tetthetsforsøket på Kyrøyene ved oppstart og etter fisketettheten overstiger 25 kg/m³. Oransje linje indikerer tetthetsutviklingen.

Temperaturprofilen i Aquatraxmerden skiller seg tydelig fra konvensjonelle merder ved en jevnere temperaturprofil og bortfall av de laveste vintertemperaturene og de høyeste

sommertemperaturene (figur 59). Dette skyldes at vannet tas inn fra ca. 20 meters dyp hvor temperaturforskjellene mellom sommer og vinter er mindre. Gjennomsnittstemperaturen over året viste imidlertid ingen store forskjeller (figur 60).

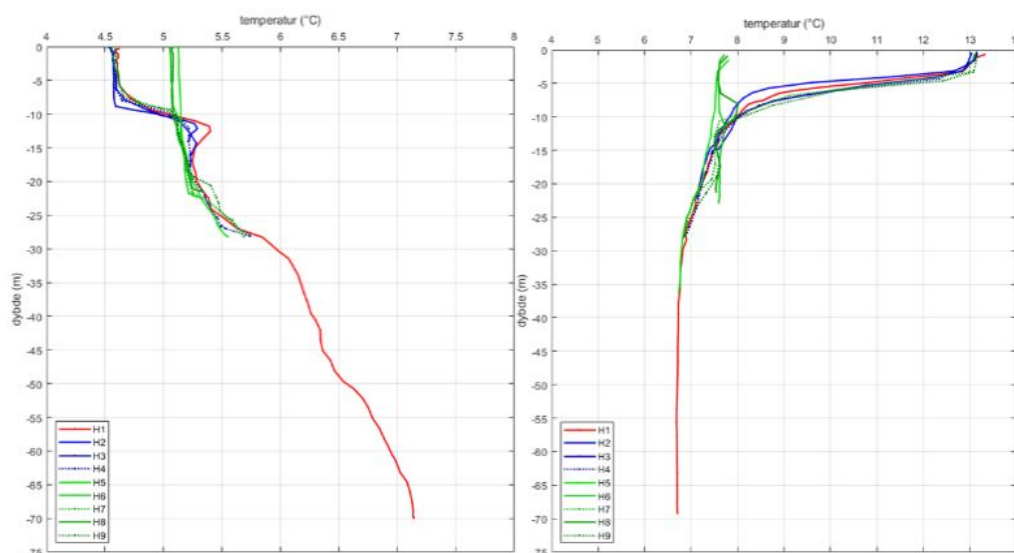


Figur 59: Temperatur (°C) målt i tilstrømmende vann, *Aquatrax 4* og kontrollmerd fra 1. juli 2020 til 1.mai 2021, i det tredje biologiprogrammet. Merk at x-aksen starter på forskjellige datoer på de forskjellige målestasjonene.



Figur 60: Boksplott temperatur (°C) målt i *Aquatrax 4* og kontrollmerd i perioden 6. september 2020 til 13. april 2021 i det tredje biologiprogrammet. Boksene omslutter intervallet 25% -75% av målingene, medianverdier er vist med horisontal strek, middelverdi som et kryss.

Som følge av Aquatrazmerdens vanndynamikk hvor store mengder dypvann løftes inn i merdens senter og trykkes ut i nedre del av siden er posisjonsvariasjoner og variasjoner over døgnet for temperatur og andre vannkvalitetsparametere langt lavere i Aquatrazmerden (figur 61). Dette er fordelaktig da både de laveste og høyeste vanntemperaturene er utfordrende for laks i ulike situasjoner. En teknologi som gir jevnere temperaturprofil gjennom året er det rimelig å anta at bidrar til bedre velferd.



Figur 61: Temperatur (°C) i stasjon H1–H9 målt 28.01.2020 (venstre) og 16.06.2020 (høyre) i det andre biologiprogrammet på Kyrøyene. Stasjon H1 (rød) er tilstrømmende vann, H2 - H4 (blå) er kontrollmerd og H5 - H9 er *Aquatraz 3*. Vær obs på ulike verdier langs x-aksen.

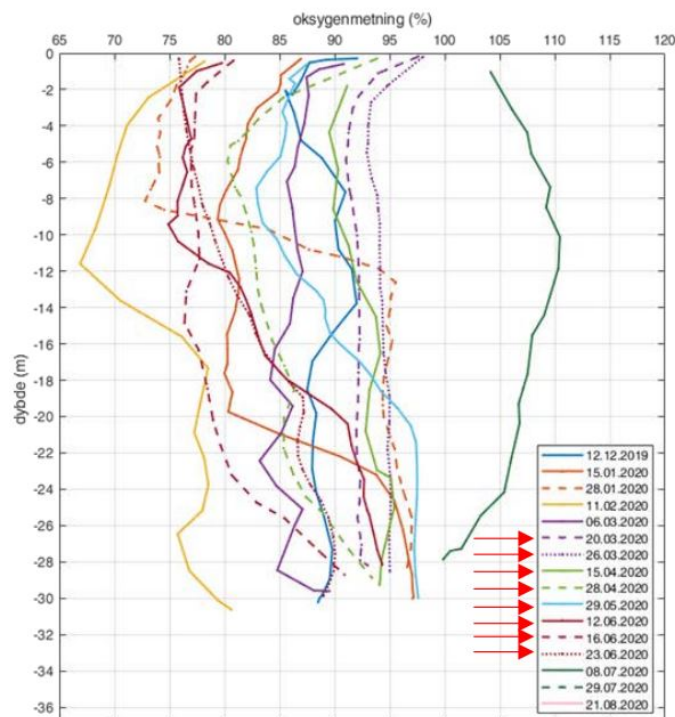
Oksygenmetningen har vært lavere i Aquatrazmerd (figur 62) enn i kontrollmerd i flere av programmene, og å forbedre oksygennivået har vært prioritert fra første til siste generasjon av merden. Dette har resultert i lav utskiftingstid, men det er fortsatt rom for forbedringer, kanskje særlig knyttet til resirkulering og påvirkning fra faktorer som tetthetsgradienter, strøm og biomasse.

Algeanalyser har ikke vist store forskjeller mellom Aquatrazmerd og kontrollmerder. I kapittel 5.1.2 og figur 40 er det indikert at det likevel kan ha vært forskjeller. En hyppigere monitorering kunne vært nyttig for å dokumentere mulige forskjeller.

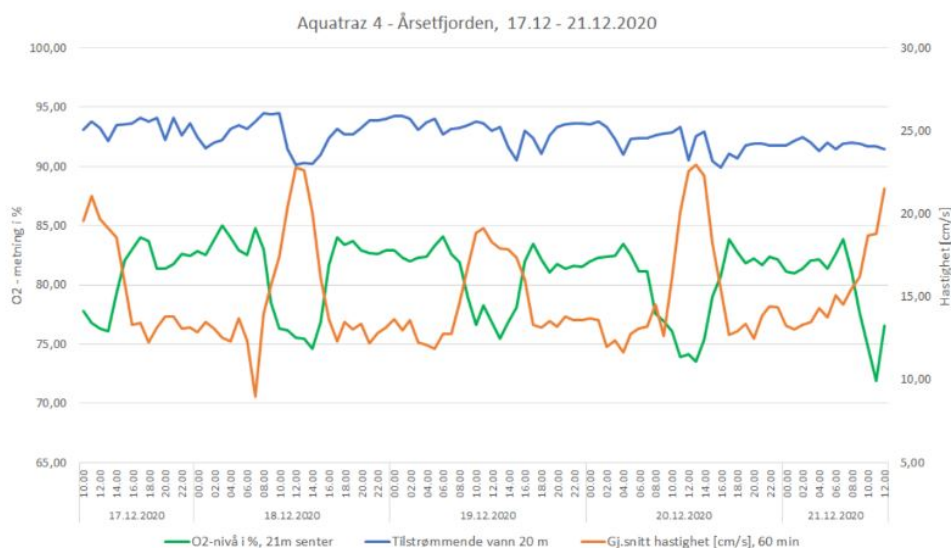
Analysen for luselarver har gitt interessante resultater, metodiske problemstillinger er tatt opp i rapporter fra biologiprogrammene.

Et annet hovedfunn var at fiskens adferd med sykliske endringer gjennom døgnet gir betydelige utslag på både vannstrøm og vannutskifting i merden, slik det ble observert i det tredje biologiprogrammet (figur 63). Dette påvirket også oksygenmetningen i vannet inne i merden gjennom døgnet. Denne effekten er så stor at den ikke kan neglisjeres i design av semilukkede merdsystemer.

AQT1 nært sentrum



Figur 62: Oksygenmetning (%) i stasjonen nært sentrum av *Aquatraz 1* i tetthetsprogrammet på Kyrøyene. De hydrografiske målingene er utført i perioden desember 2019 – august 2020. Se tegnforklaringen nederst til høyre for nøyaktig måledato tilhørende hver graf. Rød pil indikerer dato med en fisketetthet på 25 kg/m³ eller mer.



Figur 63: Grafisk framstilling av oksygenmetning og vannstrømhastighet i *Aquatraz 4* (AQT4) i det tredje biologiprogrammet. Sirkulær vannstrømhastighet på 2 m dyp, 2 m fra merdvegg i AQT4 (oransje), oksygenmetning i senter av merd på 21 m dyp (grønn) og for tilstrømmende vann på 20 m dyp (blå). Måleperiode fra 17. -21. desember 2020. Biomasse i merd ca. 960 tonn. I dette tidsrommet var 6 av 8 luseskjørt installert.

6.3.5 Adferd

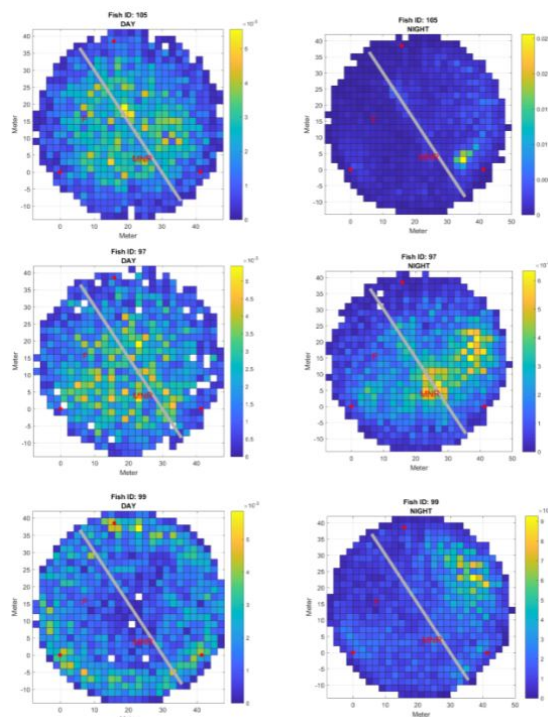
Monitorering av enkeltindividers adferd og gruppeadferd ble sett på som nyttig informasjon under utviklingen av Aquatraz. Fra før vet man at erfarne røktere raskt vil gjenkjenne forskjellig gruppeadferd, blant annet vet man at ved trenging vil stresset fisk søke mot bunnen. Et annet aspekt er at det i en merd vil være et hierarki⁴ som påvirker hvor det enkelte individet velger å stå i merden.

Slik kunnskap har man i Aquatrazprosjektet blant annet valgt å spille på lag ved trenging, der fisken vil søke mot bunnen og derfra fraktes ut av merden. Det var også av interesse å avdekke i hvilken strømhastighet ulike individer velger å stå i, ved eksempelvis ulike vanntemperaturer og fiskestørrelser. Videre var det interessant å se på adferd under føring, på dagen kontra om natta og mønster gjennom året.

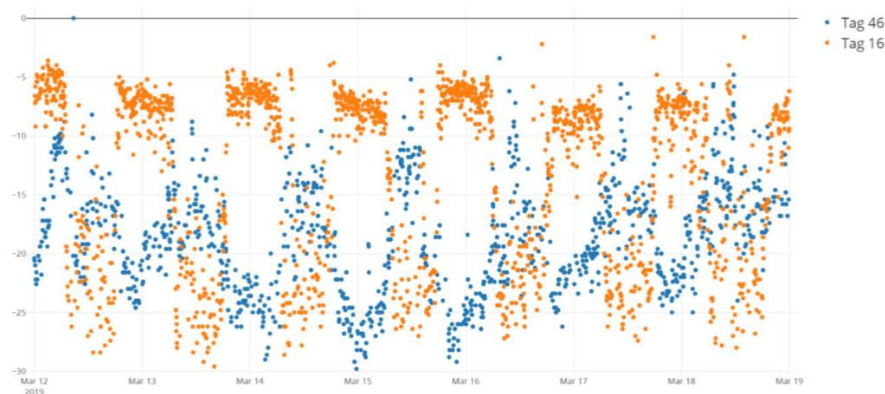
Slik informasjon kunne så benyttes til å optimalisere trenging og levering, vannstrømhastigheter gjennom produksjonen, gi kunnskap om fiskens innvirkning på vannstrømmen, fisketetthet i ulike deler av merden og flere andre forhold.

Et av de viktigste verktøyene som ble brukt for å registrere individers posisjon i merden var akustisk telemetri⁷. Det ble operert inn transpondere i et lite antall fisk. Lydsignalerne fra transponderne ble fanget opp av tre hydrofoner som ved hjelp av triangulering bestemte fiskens posisjon. Transponderne kan også benyttes til å logge akselerasjon.

Et av hovedfunnene som fortsatt ikke er forstått er de store individuelle forskjellene for hvor i merden fisken velger å oppholde seg (figur 64). Spesielt interessante er resultatene utenom føringstidene, hvor funnene er mindre forstyrret av spiseadferd. Det ble observert at enkelte individer ved ulike tidspunkt tydelig foretrakk spesielle posisjoner i merden, og at enkelte individer var i motfase slik at de sjelden eller aldri møttes (figur 65), mens andre i større grad fulgte hverandre. Av posisjoner som utmerket seg som populære var området like bak strømsetterne, der det var høyest vannstrømhastighet (figur 37). Dette tyder på at vannstrømhastighetene ikke har vært for høye i merden, men sannsynligvis for lave. Merden har lavere vannstrømhastighet i midtseksjonen og høyest bak strømsetterne og ut mot sidene. Dette har gitt valgfrihet for det enkelte individ til å finne en passende hastighet og det er observert en tendens til at området i midten er lavere benyttet.

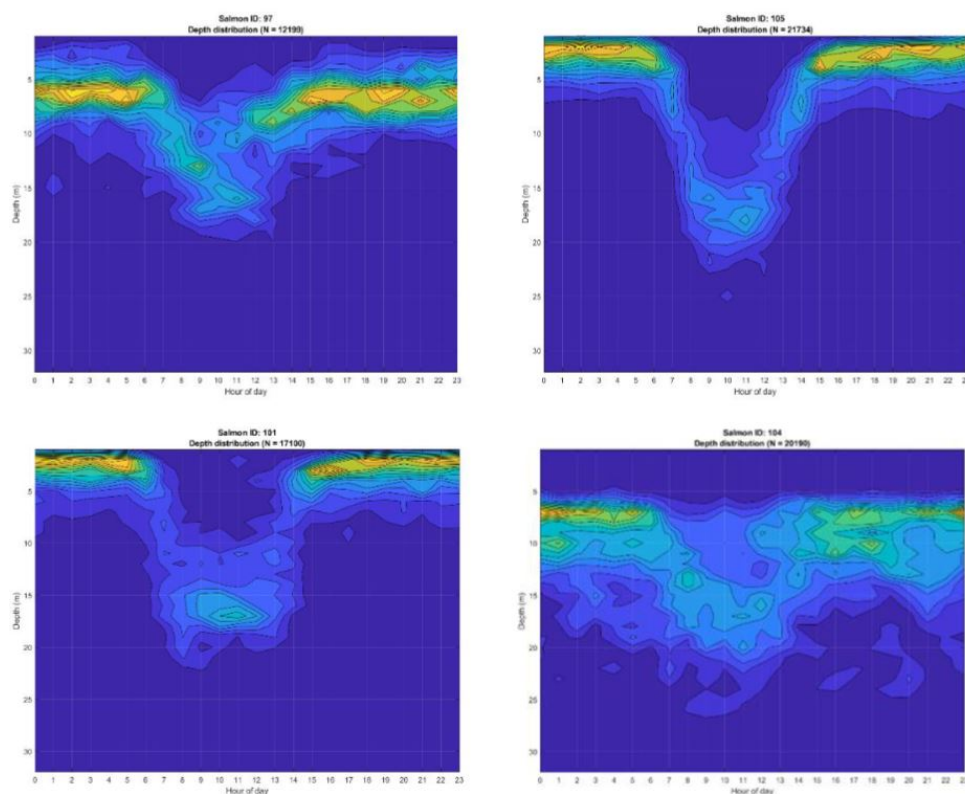


Figur 64: Horisontal fordeling av 3 laks (ID 97, 99 og 105) i *Aquatraz 1* dag (venstre panel) og natt (høyre panel) over en periode på 25 dager i november/desember 2018. Fordelingene er vist som frekvenser av registreringer i hver rute i horisontalplanet av merden der gult representerer hyppige registreringer og blått sjeldne registreringer. F er utføringssted, MNR er plassering av Midt-Norsk-ring (up-welling system), røde prikker er plassering av mottakere, grå tverrgående strek er gangbru.



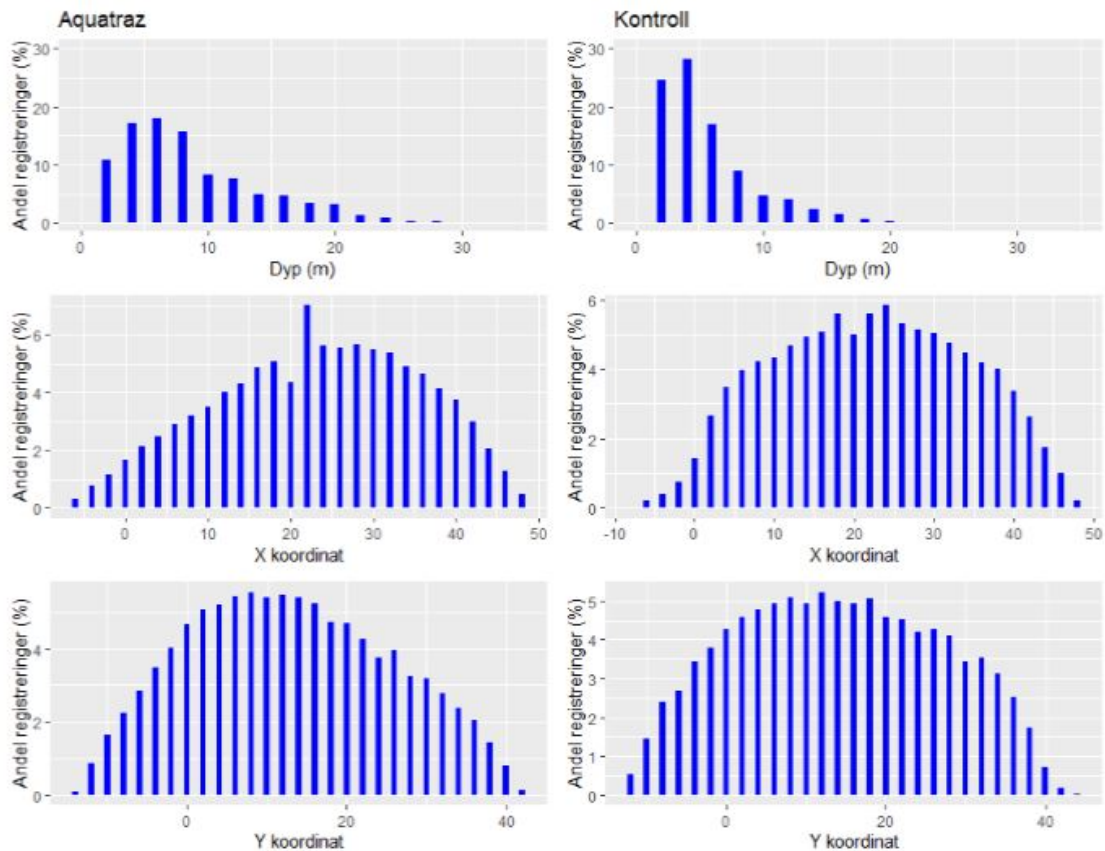
Figur 65: Dybdebruk til to laks (ID 16 og 46) i *Aquatraz 1* 12.-19. mars 2019.

I likhet med andre studier ble det registrert tydelige døgnmønstre i adferd hvor den generelle tendensen er at fisken står nærmere overflaten på natten (figur 66). Imidlertid var det et gjennomgående funn at dybdefordelingen og den generelle fordelingen av fisken var jevnere i Aquatrazmerden (figur 67 og 68). Tidligere studier på drivere for adferd og posisjonering (se for eksempel¹⁵) gir grunnlag for å anta at dette skyldes den mer homogene vannkvaliteten, og da særlig uniform temperatur på ulike dyp. Dette betyr at selv ved betydelig høyere teoretisk tetthet i Aquatrazmerd (som er relatert til tilgjengelig volum), har den jevnere fordelingen av individer i Aquatrazmerden medført at lokal opplevd tetthet



Figur 66: Dybde tetthetskontur gjennom hver time av døgnet for fire laks i *Aquatraz 1* over en periode på 24 dager i november/desember 2018.

i Aquatrazmerden er nærmere den teoretiske tettheten. For konvensjonelle merder med mer ujevn fordeling vil den opplevde tettheten være betydelige høyere sammenlignet med den beregnede.

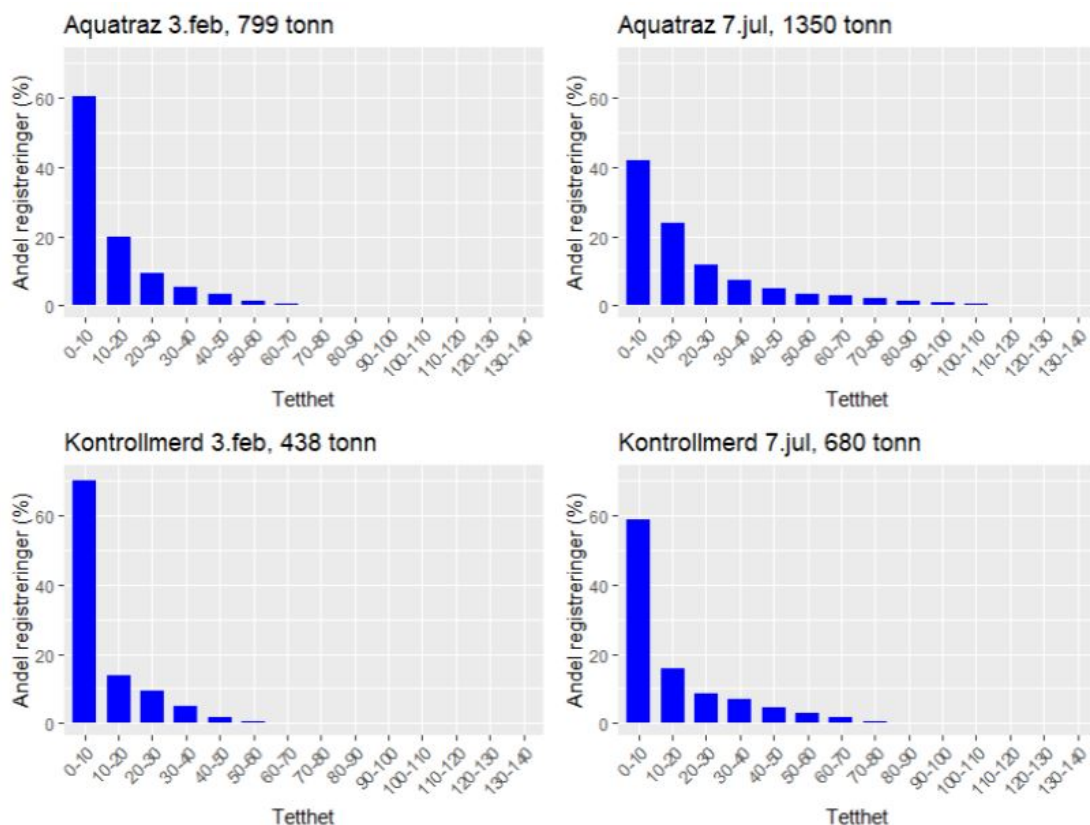


Figur 67: Andel registreringer (%) i x, y og z retninger fordelt på 2 meters intervall i *Aquatraz 3* (AQT3) og kontrollmerd (KTR) i det andre biologiprogrammet.

På gruppenivå ble det i siste program valgt å benytte et ekkolodd spesialutviklet for å gi et bilde av biomassens fordeling i en merd. Ekkoloddet besto av fire svingere som hver sendte lydbølger i en kjegle med 30 graders vinkel, altså 15 grader ut fra senterlinjen. De fire svingerne var vinklet slik at de til sammen ga et bilde som nesten dekket det samme volumet som 1 kjegle med 60 graders vinkel. Ekkoloddet fungerte svært godt på utsiden av Aquatraz og vil sikkert også fungere godt i tradisjonelle nøter, men inne i en stålmerd oppstod mye bakgrunnstøy som forstyrret resultatene. Hvorvidt støyproblemene skyldtes refleksjoner av signaler fra svingerne eller intern bakgrunnstøy er uklart.

For å vurdere både gruppeadferd og individadferd ble det også benyttet kamera som vanligvis ble benyttet til observasjon av adferd ved føring, samt filming ved hjelp av ROV.

Også annen kamerateknologi ble benyttet, et såkalt 360°-kamera som filmer i alle retninger samtidig. Ved hjelp av tilhørende software kan filmen i ettertid spilles av og retningen man ser i bestemmes, eller man kan bruke VR-briller for å se opptaket. Dette muliggjør at eksempelvis ett individ kan følges mens det svømmer forbi og over en mye lengre distanse enn hva et vidvinkelkamera kan presentere. Teknologien er også enkelt å bruke da det ikke krever kontroll på kamerahusets retning.



Figur 68: Beregnet fordeling av biomassetetthet (kg/m^3) i ulike vannvolum i *Aquatraz 3* og kontrollmerd i det andre biologiprogrammet (på Kyrøyene) med utgangspunkt i total biomasse 3. februar og 7. juli 2020.

Det ble benyttet droner da film fra stor høyde ble antatt å gi bedre bilder av fisk på større dyp sammenlignet med visuelle observasjoner fra lavhøyde. Dette viste seg også å stemme, men metoden ble utkonkurrert av blant annet 360°-kameraet.

6.4 Kunnskaphull og behov for forskning

Aquatrazprosjektet har generert mye ny kunnskap innen de fleste av områdene det er jobbet med gjennom prosjektet. Dette spenner svært vidt fra områder som praktiske forhold ved drift, til hydrodynamikk, fiskehelse, velferdsindikatorer, CFD-analyser, målemetodikk og tekniske løsninger. Progresjonen og resultatene i et utviklingsprosjekt avhenger i særlig grad av at prosjektledelsen er åpen for og etterspør innspill fra alle involverte, og at disse følges opp. Her er det viktig å fremheve at erfaringer og kunnskap på alle nivå må sys sammen om resultatet skal bli godt. Aquatrazprosjektet har fungert slik, der både røktere, teoretikere og ledelse har levert synspunkter og innspill, blitt tatt på alvor og fått gjennomslag for endringer.

Selv om det har vært involvert tunge fagmiljø og personer med lang erfaring har det i prosjektet dukket opp spørsmål som ikke har latt seg besvare og slik avdekket kunnskaphull som bør lukkes. Noen av disse er mest relevant for semilukkede eller lukkede enheter, mens andre er allmenngyldige.

6.4.1 Trykk og undertrykk

Problemstillingen med trykk og undertrykk kom opp i forbindelse med vurderinger av ulike tekniske løsninger for pumping av fisk fra merden og over i brønnbåt. Fra første generasjon og under utviklingen av de påfølgende merdene ble ulike metoder for å ta ut fisken på det laveste/dypeste tilgjengelige punktet for fisken testet ut. I de tre første merdgenerasjonene ble merden hevet ved lasting av fisk til brønnbåt, det dypeste fisken ble lastet fra var ca. 7 meter.

Under designarbeidet med fjerde generasjon ble en løsning hvor en tar ut fisk fra laveste tilgjengelige punkt uten å heve merden vurdert. Det ble da stilt spørsmål om lasting til brønnbåt med typisk hastighet i lasterørene på ca. 3 m/s fra 30 meters dyp og opp til overflaten og videre over i brønnbåten kunne utgjøre en risiko for fiskehelse eller -velferd. Det ble antatt at fisken ved slik pumping ville oppleve en trykkendring fra 3 bar overtrykk til -0,4 bar relativt til atmosfærisk trykk i løpet av en slik lasteprosess. Disse trykkene fremkommer ved å anta pumping fra 30 meters dybde og at fisken suges opp til 3,5 meter over havoverflaten på tur inn i brønnbåten. Friksjonen øker undertrykket ytterligere med 0,5 meter løftehøyde. Videre ønsket man å se på om dette, hvis det skulle utgjøre en risiko, medførte høyere risiko om startpunktet for fisken var på 30 meters dybde enn om startpunktet var på 10 meters dybde.

Relevant litteratur ble gjennomgått, og ekspertise i relevante institusjoner jobbet med problemstillingen både selvstendig og via sitt nettverk. Det ble også sett til humanmedisinen, hvor det ble opprettet kontakt med ekspertise innen dykkermedisin og sett på litteratur fra flymedisin. Det ble konkludert med at det etter all sannsynlighet ikke er mer problematisk å pumpe laks fra 30 meters dybde og inn i en brønnbåt enn det er å pumpe den fra 10 meters dybde.

Gassblæresjuke er en godt beskrevet lidelse hos fisk, men symptomene kan være vage og diagnosen kan være vanskelig å stille. Vevsforandringer kan også komme lang tid etter påvirkningen. For mer kortvarige endringer i trykk/undertrykk er påvirkninger på laksens helse og velferd ikke så omfattende dokumentert, og dette er også komplekse og krevende problemstillinger å undersøke.

6.4.2 Vannstrømhastighet

Det er gjort betydelig med arbeid på vannstrømhastigheter og laks i settefiskstørrelser, og det bygges stadig kunnskap om forskjellige vannstrømhastigheter og ulike effekter funksjonelt og morfologisk. De siste årene er det generert en del kunnskap om vannstrømhastighet og effekter også hos større laks, men det gjenstår fortsatt betydelig arbeid på dette feltet.

I Aquatrazprosjektet ble det benyttet strømsettere som satte opp en roterende vannstrøm i merden, og det ble jobbet med å etablere en protokoll for antatt optimal vannstrømhastighet for laks i sjøfasen fra smoltstørrelse til slaktefiskstørrelse. Fiskens størrelse ble tatt inn i matrisen, likeledes vanntemperatur, smoltifisering, sykdom og overgang fra et miljø uten nevneverdig vannstrøm til et miljø med vannstrøm etter protokoll.

Det er åpenbart at det er variasjon mellom ulike individer med hensyn til toleranse

og preferanse for vannstrømhastighet, noe som også er godt beskrevet i litteraturen. Adferdsstudier i Aquatrazprosjektet viste også individuelle preferanser for posisjonering og at den lokale vannstrømhastigheten var utslagsgivende faktor, som beskrevet i kapittel 6.3. Konseptet Aquatraz tilbyr fisken ulike vannstrømhastigheter fra lave i senter til høyere ut mot siden og bak strømsetterne. Dette antas å være fordelaktig da det tilrettelegger for at ulike individer kan velge å stå i ønsket vannstrømhastighet.

Det er behov for å utvikle bedre protokoller for vannstrømhastighet og blant annet kartlegge styringssignaler som kan brukes til å justere protokollene i praktisk drift. Det er også behov for mer kunnskap om effekter av ulike protokoller på funksjonelt og morfologisk nivå samt implikasjoner for drift, produksjon og produktkvalitet.

6.4.3 Oksygennivå og biologiske effekter

Det er utført mye forskning på sammenhengen mellom oksygennivå og biologiske effekter, men studiene er i stor grad utført i laboratorier og få under realistiske forhold i storskala anlegg. I Aquatrazprosjektet er det utført statistiske analyser med data fra produksjonsstyringssystemer, miljødata og ulike andre datakilder (ikke publisert).

I den ene undersøkelsen ble det funnet sammenheng mellom lav oksygenmetning og redusert tilvekst målt som VF3 på dagnivå, og tendens til økt dødelighet. Dette sammenfaller med eksisterende litteratur på området, men våre funn indikerer at de negative effektene inntreffer ved høyere oksygennivåer. Dette indikerer at det kan være behov for mer forskning og flere feltstudier som er designet for å avdekke effekter av suboptimale oksygennivåer.

6.4.4 Gjellehelse gjennom sesonger

I flere av biologiprogrammene er det observert en dynamikk i gjellescore hvor status i starten er god for deretter å bli gradvis forverret i vinterperioden, etterfulgt av en forbedret score mot sommeren.

Årsaken til denne observerte dynamikken er ukjent, og står i motsetning til en generell oppfatning om at gjellehelsen er dårligst på høsten ved høye temperaturer i sjøen, for så å bedres ved avtagende vanntemperatur utover vinteren. Infeksiøse agens kan ikke forklare funnene og det gjenstår arbeid for å finne årsaksfaktorer som kan forklare slike forløp.

6.4.5 Fôr og fôring i semilukkede enheter med aktiv vannstrøm

Aquatrazkonseptet er semilukket merd med stålvegger ned til et gitt dyp og roterende vannstrøm. Dette gir nye muligheter og nye utfordringer med hensyn til fôr og fôring.

Muligheter ligger blant annet i at det er en vannstrøm og at den ytre begrensningen for fisken er tett i den øverste delen av merden. Dette gir anledning til å tenke nytt om utføringspunkter og fôrets fysiske egenskaper. I Aquatrazprosjektet er det testet ut ulike metoder for å tildele fôret slik at vannstrømmen bidrar til fordeling av fôrpelletene på samme måte som i settefiskanlegg. Et annet prinsipp som er prøvd ut er å tildele fôrpellet

som er ekspandert til et nivå som gjør at pelleten flyter. Tette vegger sikret at avdrift i overflaten ut av merden ble unngått, noe som gir svært god kontroll på hver pellet. Teoretisk skal man kunne eliminere svinn av fôrpellet ut av merden. På den måten kan man bedre fôrutnyttelsen og produksjonsøkonomien, samt redusere fôrsvinn og utslipp fra merden.

Imidlertid er det også utfordringer og kunnskapshull knyttet til bruk av flytefôr. Konvensjonell laksepellet har en synkehastighet som ved tildeling i overflaten medfører at fôret blir fordelt i et vannvolum. Ved å tildele pellet i overflaten som har egenskaper slik at den flyter blir det arealet pellet tildeles på muligens større, men med hensyn til tilgjengelighet for et høyt antall individer kan ikke dette kompensere for at man mangler tildeling i dypet. Tildeling av pellet under vann som så flyter opp til overflaten ville økt tilgjengeligheten og samtidig bevart fordelene med flytefôr. Dette bør det jobbes videre med. Optimalisering av utføringsteknikk i samspill med fôrpelletens fysiske egenskaper og ikke minst laksens adferd inklusive konflikt-/konkurransedferd er et område med behov for mer kunnskap.

Et annet tema er sammensetning av fôr til fisk som står i en betydelig vannstrøm kontra fisk som står i naturlig vannstrøm. Det er beskrevet en sammenheng mellom økt tilveksthastighet og økt vannstrømhastighet tidligere (se blant annet⁹), men også at tilveksthastigheten kan gå ned dersom vannstrømhastigheten blir for høy¹⁹. Det er også i Aquatrazprosjektet indikasjoner på ulikheter i muskel/filet mellom Aquatrazmerd og kontrollmerd, selv om det ikke ble oppnådd så høye vannstrømhastigheter som opprinnelig planlagt. Det er ikke utenkelig at fisk som står i en betydelig vannstrøm har andre ernæringsbehov enn fisk i konvensjonelle merder, og at det er mulig og hensiktsmessig å tilpasse fôrresepten deretter. Dette er ikke prøvd ut i Aquatrazprosjektet, men er et felt som bør belyses i større bredde.

6.4.6 Slamoppsamling

Semilukkede enheter med vannstrøm gir bedre mulighet for oppsamling av avføring/slam fra enheten sammenlignet med konvensjonelle åpne merder. På Aquatraz er det i tillegg godt med plass og betydelig lastekapasitet, noe som åpner opp for at slamforedlingsutstyr kan installeres på selve merden. Det finnes allerede en del kunnskap og erfaringer med slamoppsamling og videre håndtering, men for å redusere miljøavtrykket og utnytte ressurser best mulig er det behov for nye tekniske løsninger for oppsamling/foredling og mer kunnskap om de biologiske implikasjonene ved ulike grader av oppsamling.

6.4.7 Smittespredning

Semilukkede enheter med dypvannsinntak har dokumenterte positive effekter med hensyn til eksponering for smittsomme stadier av lakselus. Det er også vist at overflatevannet kan ha høy konsentrasjon av salmonid alphavirus, som forårsaker pancreas disease (PD) (²⁰).

Det eksisterer imidlertid begrenset kunnskap om hvordan semilukkede enheter påvirker den generelle smittesituasjonen, dette er et felt hvor det er behov for betydelig mer dokumentasjon.

6.4.8 Helse og velferd

I norsk oppdrettsnæring benyttes det ulike indikatorer for å beskrive helse og velferd til laks. Systematiske sammenlikninger mellom konvensjonelt oppdrett og ny teknologi er imidlertid i en startfase, både med hensyn til indikatorene som benyttes, hvilke utslag som er normalt og hvilke som er av størst betydning. Det er behov for flere og bedre metoder for å beskrive helse- og velferdssituasjonen og standarder for å kunne gradere tilstanden. Dette er blant annet vesentlig når ulike teknologier skal sammenlignes.

6.4.9 Utnyttelse av semilukket teknologi

Semilukket merdteknologi er i en tidlig fase, og det er fortsatt begrenset erfaring med slik teknologi. Det innebærer at det også er begrenset erfaring med hvordan teknologien bør benyttes for å oppnå best mulige resultater — for fiskens velferd og helse, for bedriftsøkonomi, og for å nå bærekraftsmål som samfunnet etterspør framgang på.

Ny teknologi gir potensielt forandring på mange områder samtidig, og med implikasjoner fra individ til samfunn. Aquatrazprosjektet har gitt indikasjoner på bedre helse og velferd, det har vist til lavere produksjonskostnader og bedre marginer for oppdretter, og pekt på betydelig forbedring i lusesituasjon og svært lav risiko for rømming. Hvordan man utnytter slike fordeler best mulig har blitt sett på i utviklingsprosjektet, men det er behov for betydelig mer arbeid på dette feltet.

6.5 Forskrifter, regelverk og standarder

I forbindelse med utvikling av ny teknologi må en forholde seg til gjeldene lover og forskrifter. Drift av akvakulturanlegg innenfor norsk landterritorium og territorialfarvann, på kontinentalsokkelen og i Norges økonomiske sone er regulert av forskrift om drift av akvakulturanlegg (akvakulturdriftsforskriften). Ved utvikling av ny teknologi er det spesielt to paragrafer i akvakulturdriftsforskriften som skaper utfordringer med hensyn til å utvikle ny lønnsom merdteknologi, nemlig §25 Tetthet og §47a Maksimalt antall fisk.

I følge §25 skal fisketettheten per produksjonenheter med stamfisk og matfisk av laks eller regnbueørret ikke overstige 25 kg/m³, unntatt i slaktemerder eller lukkede anlegg. Denne begrensningen er knyttet til dagens teknologi med åpne merder hvor en ikke kan regulere vanninntaket, men er prisgitt omgivelsene. For ny semi-lukket teknologi hvor en har mulighet til å regulere vannkvaliteten, bør denne grensen erstattes med funksjonskrav, dvs. ved å sette krav til for eksempel vannutskiftning, overvåkning av oksygennivå, redundans, beredskap osv.

Erfaring fra Aquatrazprosjektet viser at skjerming mot lus fungerer. Ved å unngå avlusing kan semi-lukket teknologi bidra til et stort løft med hensyn til fiskevelferd ved å minimere håndtering av fisk fra utsett til slakt.

Investeringskostnadene for semi-lukket teknologi er betydelig høyere enn for åpen merdteknologi. Gjennom Aquatrazprosjektet har case-studier fra Årsetfjorden og Eiterfjorden vist at det er mulig å oppnå lavere produksjonskostnader med semi-lukket teknologi enn

med konvensjonelle merder, se kapittel 5.5. Ved å sette relevante funksjonskrav til teknologien i stedet for en absolutt grense, vil en stimulere og muliggjøre at god merdteknologi utvikles og raskere tas i bruk ved at oppdretter kan hentet ut stordriftsfordeler, dvs. større produksjon (biomasse) å fordele investeringskostnadene på.

I henhold til akvakulturdriftsforskriften §47a skal antall fisk per produksjonsenhet i sjø ikke overstige 200 000. Dette kravet er satt for å begrense konsekvensen av rømming fra en produksjonsenhet. Risikoen for rømming er produktet av sannsynlighet og konsekvens. Maksimalgrensen på 200 000 individ er basert på dagens teknologi med åpne merder med notpose. Konsekvensen (rømningspotensialet) av full kollaps av en produksjonsenhet er uavhengig av teknologien, da en må anta at all fisken i en produksjonsenhet kan rømme. Når det gjelder sannsynligheten for rømming, så vil det imidlertid være stor forskjell mellom ulike teknologier, og hvor merdene driftes (miljølaster).

Utfordringen med ny teknologi er at historiske rømningsdata mangler, slik at sannsynligheten for rømming er ukjent. I forbindelse med utviklingstillatelsene har Fiskeridirektoratet løst dette ved å gi dispensasjon fra §47a for merdkonsept som, basert på en kvalitativ risikovurdering, har lavere rømningsrisiko enn konvensjonelle merder.

Aquatrazprosjektet har i løpet av prosjektperioden, med dispensasjon fra Fiskeridirektoratet og Mattilsynet, gjennomført forsøk med økt antall fisk og fisketetthet. I forsøkene har vi nådd en tetthet på ca. 30 kg/m³ og hatt maksimalt ca. 395 000 laks i en Aquatraz. Dispensasjon er greit så lenge merdteknologien er under utvikling, men når en går over til kommersiell fase er det viktig at usikkerhet knyttet til maksimalt antall fisk fjernes, da dette har stor innvirkning på produksjonskostnadene.

Antallsbegrensningen slår også negativt ut for konsepter som først blir egnede ved en betydelig størrelse eller for anlegg som Aquatraz, som sannsynligvis vil gi ytterligere redusert produksjonskostnad om størrelsen på merden økes.

Dagens forskrift krediterer ikke bruk av mer rømmingssikker teknologi. Dette bør endres for å stimulere utvikling av teknologi som bidrar til å redusere rømningsrisiko innen norsk akvakulturnæring. Nye merdsystemer, både åpne og semi-lukkede, som basert på en kvalitativ risikovurdering har lavere rømningsrisiko enn konvensjonelle merder, bør gis permanent godkjenning for et større antall fisk enn dagens maksimalgrense.

7 Videreutvikling og nye løsninger

Utviklingsprosjektet har vist at produksjon i Aquatrazmerder kan løse mange av utfordringene næringen står ovenfor, samtidig som produksjonskostnadene er redusert sammenlignet med konvensjonelle merder. Dette lover godt for fremtiden, da teknologien kan tas i bruk av alle oppdrettere uten behov for større endringer med hensyn til kompetanse eller utstyr. Slik kan Aquatraz i løpet av kort tid bidra til en positiv utvikling i næringen. I kapittel 7.1 vil områder med det antatt største videreutviklingspotensialet belyses, mens kapittel 7.2 argumenter for viktigheten av fortsatt satsning på lukket og semilukket teknologi med hensyn til mer overordnede faktorer som næringens konkurransekraft, bosetning langs kysten og miljø.

7.1 Områder med rom for videreutvikling

For ny teknologi er det vanligvis mye å hente på optimalisering av både teknologi og hvordan den benyttes. Følgende områder antas å være særlig viktige i denne sammenhengen; utvikle bedre driftsformer, optimalisere den daglige driften og ved å benytte teknologien der den gir de største fordelene. I det følgende vil blant annet disse områdene belyses, samt hvilke deler av teknologien som kan forbedres ytterligere.

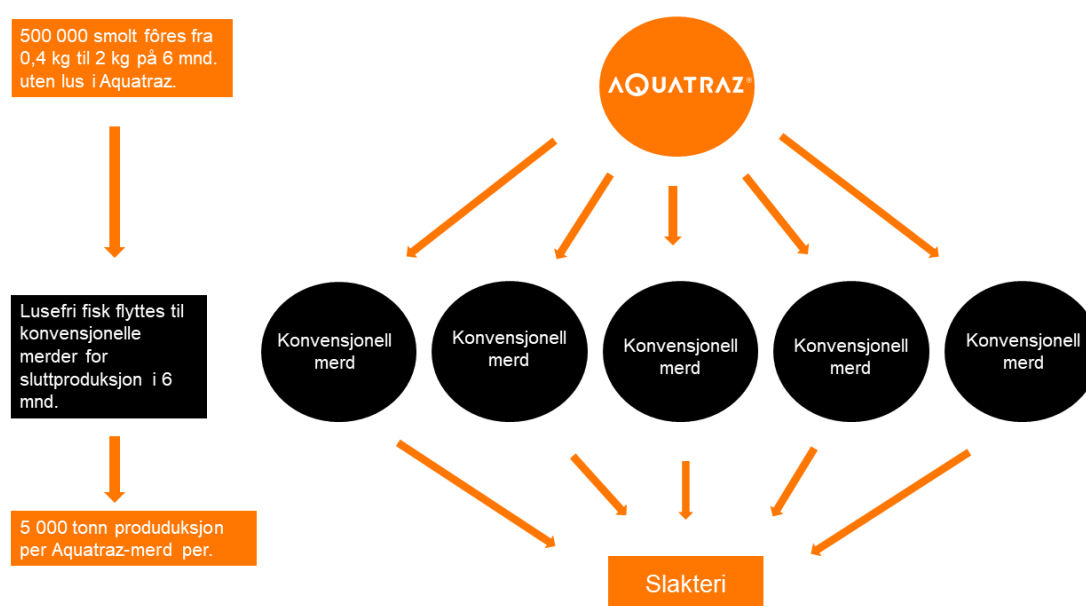
7.1.1 Aquatrazteknologien

Gjennom utvikling av fire generasjoner er teknologien tatt fra konseptnivå til et teknisk nivå hvor merden er klar til kommersielt bruk, i tråd med en av hovedmålsetningene i prosjektet. Samtidig ser vi at det er muligheter for ytterligere forbedringer innen blant annet følgende områder:

- Vanndynamikk i merd
- Dybde/utforming av luseskjørt
- Økt automatiseringsgrad
- Fôringsteknologi
- Bedre støttesystemer for operasjon og drift
- Reduksjon av byggekost/m³

7.1.2 Nye driftsformer

I prosjektet var det viktig å benytte merden under sluttproduksjonen som er den mest utfordrende perioden, slik at eventuelle svakheter ble avdekket. Spesielt med hensyn til vannutskiftning og vannkvalitet er perioden krevende, da biomassen ofte er størst. Det er også i denne perioden problemene med lus er mest fremtredende. Figur 69 fremstiller en driftsform som viser potensialet ved produksjon av smolt i Aquatraz med overflytting til konvensjonelle merder før slakt.



Figur 69: Driftsmodell - smoltproduksjon i Aquatraz

I denne driftsmodellen tas det frem 500 000 individer fra ca. 0,4 kg til 2 kg i Aquatraz i løpet av 6 måneder. Fisken flyttes så ut i konvensjonelle merder hvor den i løpet av 6 måneder tas frem til slakt. Kort tid etter utflytting av fisk fra Aquatraz settes det på nytt inn 500 000 smolt, som så flyttes over i konvensjonelle merder etter 6 måneder. Gjennom et år produseres slik 1 000 000 smolt fra ca. 0,4 kg til i overkant av 5 kg, noe som gir en årlig produksjon på ca. 5000 tonn. Videre antas at produksjonen i Aquatraz gir lusefri fisk og at også sluttproduksjonen i konvensjonelle merder kan gjennomføres uten avlusning. I konvensjonell drift antas videre at lusekost/kg er 10 kroner. Ved å multiplisere den årlige lusefrie produksjonen med lusekostnadene blir besparelsen for oppdretter 50 000 000 kr/år. Modellen er svært forenklet for å tydeliggjøre potensialet en slik driftsmodell kan gi. Den tar blant annet ikke hensyn til dødelighet, tid til vasking, logistikk og andre faktorer som vanskeliggjør en optimal produksjon. Samtidig er antallet fisk som settes ut i merdene satt til 500 000 og det antas at dette antallet kan økes tilstrekkelig til å ballansere andre ikke-konservative antagelser.

Driftsformen tilrettelegger for omlegging til mer avlusningsfri drift med relativt få Aquatrazmerder. Om hele den norske produksjonen av laks ble gjort på denne måten ville det kreves omlag 350 merder. Anskaffelseskostnadene for disse er tilsvarende de totale årlige direkte og indirekte lusekostnadene i næringen.

Utvikling og tilrettelegging for nye driftsformer er derfor avgjørende både med hensyn til kostnader og tid det vil ta før dagens problemer knyttet til lus er løst.

I desember 2021 og januar 2022 satte SalmoNor ut smolt i Aquatrazmerdene. Smoltutsettet i noen av merdene vil etter driftsmodellen i figur 69 flyttes over i konvensjonelle merder frem til slakt, mens produksjonen vil fortsette i Aquatraz frem til slakt for andre merder. Slik genereres ny erfaringskunnskap om merdene som vil benyttes i det videre arbeidet knyttet til å finne de optimale driftsformene for teknologien.

7.1.3 Driftoptimalisering

For å utnytte teknologien optimalt må også den daglige driften tilpasses. Dette er en tidkrevende prosess da den involverer hele driftsorganisasjonen, store mengder erfaringskunnskap, og sannsynligvis også krever justering av teknologi og løsninger. Det er vanskelig å anslå hvor stor effekten av en optimalisert drift av merdene kan bli, eller hvor lang tid det vil ta før læringskurven flater ut. Det er imidlertid sannsynlig at effekten vil være betydelig, og at den kan forsterkes om oppdretter og teknologileverandør jobber målbevisst sammen med å omsette læring til forbedret drift av merdene.

7.1.4 Egnede lokaliteter

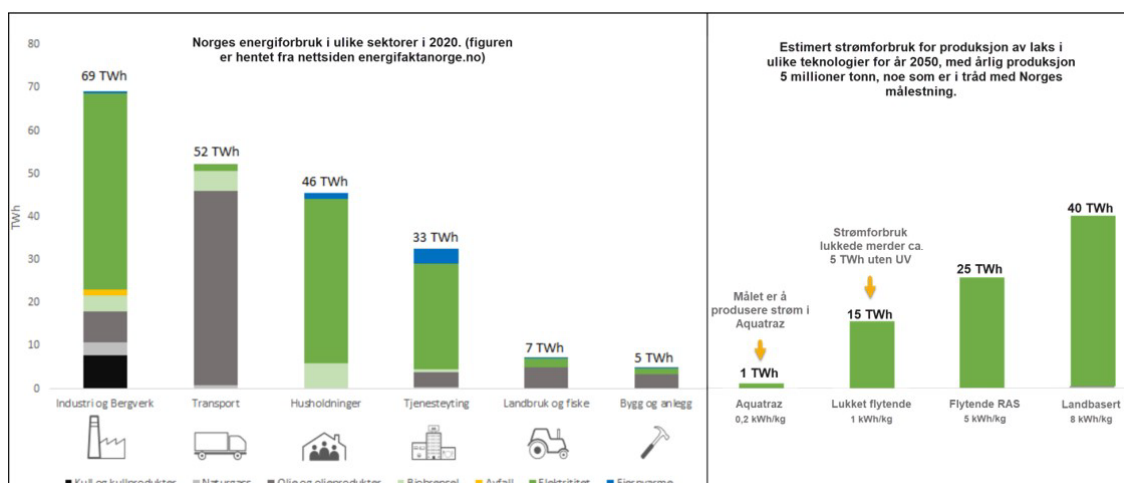
Aquatrastechnologien er i løpet av prosjektet testet ut på beskyttede fjordlokaliteter samt på en mer eksponert lokalitet. Erfaringene fra disse indikerer at Aquatrastechnologien, slik den er utformet nå, egner seg best på beskyttede fjordlokaliteter. Videre er det grunnlag for å anta at justeringer av teknologien vil gjøre den bedre egnet på mer eksponerte lokaliteter. Det er derfor viktig å avklare hvilke tekniske merdparametere og detaljutforminger som egner seg best på ulike lokaliteter, slik at mer skreddersydde løsninger kan tilbys i markedet. Samtidig er det viktig at oppdretter benytter merdene der de er best egnet.

Ingen produksjon vil være lik, og det er mange eksterne faktorer som påvirker resultatene. Optimalisering vil kreve analyser av mange produksjoner i ulike merder på forskjellige lokaliteter. Arbeidet må derfor være både systematisk og pågå over lengre tid. Videre må oppdretter og teknologiutvikler jobbe sammen slik at resultatene både kan benyttes i drift og til videreutvikling av teknologien. Potensialet i å forstå forholdet mellom teknologi og lokalitetsegenskapene (variasjon i oksygenmetning, temperatur, salinitet, strøm osv.) antas å være betydelig og kunne gi kostnadsreduksjon, reduserte miljøbelastninger og bedret HMS.

7.1.5 Lavere energiforbruk

Energiforbruket i konvensjonelle merder er knyttet til vasking og håndtering av merdene. Under normal drift sørger havstrømmene for vannutskiftningen og det benyttes dermed ingen energi til å opprettholde vannkvaliteten i merdene. For landbaserte anlegg er derimot energiforbruket i all hovedsak knyttet til opprettholdelse av vannmiljøet, og energiforbruket er høyt.

For Aquatrastechnologien er energiforbruket til håndtering i samme størrelsesorden som for konvensjonelle merder. I de tre første generasjonene ble det benyttet et patentert vannforsyningssystem som gir et energiforbruk pr. kilo produsert laks mellom 0,1 og 0,2 kWt. Figur 70 gir en skjematisk sammenligning av energiforbruk for ulike teknologier. Tallene baseres på at Norge når sitt politiske mål om 5 millioner tonn produksjon innen 2050, og at all produksjon gjøres ved bruk av hver av de ulike teknologiene. Energiforbruket kan for Aquatrastechnologien reduseres ytterligere ved å nyttiggjøre seg fiskens svømmemønster. Mer arbeid er nødvendig for å optimalisere denne teknologien.



Figur 70: Energiforbruk for ulike oppdrettsteknologier

7.1.6 Lavere materialforbruk

Gjennom effektiv utnyttelse av stålet og bruk på beskyttede lokaliteter er forholdet mellom vekten av stål og vekten av biomassen i merden ca. 0,5 kg, noe som er lavt sammenlignet med de fleste andre løsninger. Teknologien har derfor et lavt klimaavtrykk. Figur 71 viser typiske verdier for forholdet mellom stålvekt og biomasse for ulike konsepter.

TEKNOLOGI	STÅLVEKT (KG) / BIOMASSE (KG)
Åpne offshore merder, Hs > 6	ca 4kg ++
Lukkede gjennomstrømningsanlegg, Hs < 2,4	ca 2kg
Aquatraz, semilukket Hs < 2,4	ca 0,5kg

Figur 71: Forhold stålvekt-biomasse for ulike konsepter

Ved å øke tettheten i merden kan materialforbruket per kilo biomasse reduseres ytterligere.

7.1.7 Redusert arealbruk

Produksjon i Aquatrazmerdene gir minimale naturinngrep. Innenfor arealene som allerede er i bruk kan produksjonen økes betydelig og miljøavtrykket samtidig reduseres gjennom utvikling og implementering av slamoppsamlingsteknologi. Merdene antas å være godt egnet for implementering av slik teknologi da de har definerte utløp og en rigid struktur. Aquatrazmerdene kan også benyttes på lokaliteter som er uegnet for drift med konvensjonell teknologi, og slik redusere arealkonflikter og bidra til en ytterligere bærekraftig vekst i næringen. Til sist vil økt tetthet i merdene gi høyere arealutnyttelse.

7.2 År 2050 - hvor bør femdoblingen legges?

Innovasjoner

På tross av gode resultater er det fortsatt både behov og muligheter for betydelig innovasjon innenfor semilukket teknologi. Et eksempel på dette kan være vannforsyningssystemet i den siste generasjonen. Her benyttes fiskens svømmemønster til å pumpe vann inn i merda. Løsningen gir reduserte anskaffelses- og driftskostnader, samt at biologisk risiko knyttet til pumpevikt elimineres. Utvikling av slike disruptive løsninger er viktige da de åpner opp for helt nye muligheter.

Konkurranseskraft

Aquatrazprosjektet viser reduserte produksjonskostnader allerede under utviklingsprosjektet. Dette er blant annet oppnådd som følge av at teknologien utnytter Norges komparative fortrinn med en lang beskyttet kystlinje og temperert friskt vann. Slik bidrar teknologien til å styrke næringens konkurransekraft internasjonalt.

Bosetning langs kysten

Løsningen vil også bidra til fortsatt bruk og videreutvikling av den allerede eksisterende infrastrukturen langs kysten som brønnbåter, slakterier og settefiskanlegg. Dette er viktig for å holde kostnadene nede, men også for å sikre aktivitet og vekst langs kysten.

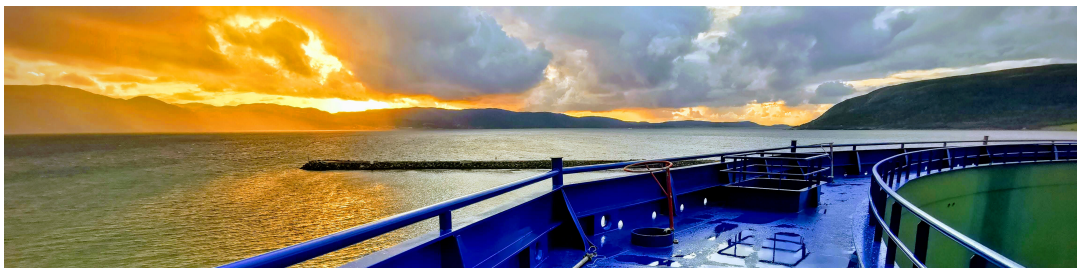
Aquatrazmerden er egnet for transport langs kysten mellom lokaliteter, men den er kostbar å transport over åpne havområder. Dette skaper et behov for en sterk lokal verfts- og verkstedsindustri langs kysten for vedlikehold av merdene. Slikt arbeid er sammenlignet med nybygg mindre sensitivt for konjunkturer og muliggjør økt andelen faste lokale ansatte.

Sirkulærøkonomi

Aquatrazmerden er bygget i stål som er et resirkulerbart materiale. Videre er Aquatraz godt egnet for utvikling av et slamoppsamlingssystem, og slik tilgjengeliggjøres en ressurs som i dag går tapt. Det eksisterer mange spennende konsepter for hvordan slammet kan utnyttes, men det eksisterer ingen fullgode løsninger for salt slam i store kvanta og her er det behov for ytterligere utvikling.

Støtte- og satsningsområder

Vi tror at hverken hav- eller landbasert oppdrett har tilsvarende muligheter som semilukket og lukket teknologi til å bidra til en rask og bærekraftig vekst i akvakulturnæringen. Det er derfor viktig at både oppdrettsnæring og myndigheter i fortsettelsen sikrer at tid og ressurser legges der potensialet er størst og innsatsen lavest til beste for næringen, kysten og nasjonen.



Referanser

- [1] Aunsmo, A. "Health related losses in sea farmed Atlantic salmon -quantification, risk factors and economic impact." Ph.d.-avh. Norwegian School of Veterinary Science, 2009.
- [2] Aunsmo, G. og Aunsmo, A. *Analyse produksjonsdata Aquatraz Eiterfjorden 2021*. 2021. URL: <https://vov0h40ndw03lvzox17vd51a-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/sites/10/2021/12/21-12-analyse-produksjonsdata-aquatraz-eiterfjorden.pdf>.
- [3] Crosbie, T., Wright, D. W., Oppedal, F., Johnsen, I. A., Samsing, F. og Dempster, T. "Effects of step salinity gradients on salmon lice larvae behaviour and dispersal". I: *Aquaculture Environment Interactions* 11 (2019), s. 181–190. DOI: <https://doi.org/10.3354/aei00303>. URL: <https://www.int-res.com/abstracts/aei/v11/p181-190/>.
- [4] Cubitt, K. F., Winberg, S., Huntingford, F. A., Kadri, S., Crampton, V. O. og Øverli, Ø. "Social hierarchies, growth and brain serotonin metabolism in Atlantic salmon (*Salmo salar*) kept under commercial rearing conditions". I: *Physiology & Behavior* 94.4 (2008), s. 529–535. ISSN: 0031-9384. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2008.03.009>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031938408000826>.
- [5] Erikson, U., Gansel, L., Frank, K., Svendsen, E. og Digre, H. "Crowding of Atlantic salmon in net-pen before slaughter". I: *Aquaculture* 465 (2016), s. 395–400. ISSN: 0044-8486. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.09.018>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0044848616304744>.
- [6] Fiskeri- og havbruksnæringens forskningsfinansiering. *900870: Improving Atlantic salmon smolt robustness to reduce losses in sea by development of screening tests, exercise regimes and markers / Utvikling av seleksjonstester, treningsregimer og markører for å styrke smoltens robusthet og redusere tap i sjø (FitSmolt)*. URL: <https://www.fhf.no/prosjekter/prosjektbasen/900870/> (sjekket 27.01.2022).
- [7] Føre, M., Alfredsen, J. A. og Gronningsater, A. "Development of two telemetry-based systems for monitoring the feeding behaviour of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) in aquaculture sea-cages". I: *Computers and Electronics in Agriculture* 76.2 (2011), s. 240–251. ISSN: 0168-1699. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.02.003>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169911000536>.
- [8] Hvas, M., Folkedal, O. og Oppedal, F. "Fish welfare in offshore salmon aquaculture". I: *Reviews in Aquaculture* 13.2 (2021), s. 836–852. DOI: <https://doi.org/10.1111/raq.12501>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/raq.12501>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/raq.12501>.
- [9] Jørgensen, S. mfl. *Kunnskap- og metodeutvikling for å styrke laksens robusthet og helse*. Des. 2012.
- [10] Mørkøre, T., Espe, M., Veiseth-Kent, E., Terjesen, B., Erikson, U., Koppang, E. og Rørvik, K. *Bred kartlegging av faktorer som påvirker teksturegenskaper i oppdrettslaks ved multivariat tilnærming*. 2009. URL: https://www.fhf.no/prosjekter/prosjektbasen/900086/?fileurl=https://fhfno.sharepoint.com/sites/pdb/Dokumenter/900086/Rapport_41-2009-27012010.PDF&filename=Rapport%5C%20Bred%5C%20kartlegging%5C%20av%5C%20faktorer%5C%20som%5C%20p%5C%20C3%5C%A5virker%5C%20teksturegenskaper%5C%20i%5C%20oppdrettslaks%5C%20ved%5C%20multivariat%5C%20tiln%5C%C3%5C%A6rming.

- [11] Nilsen, A., Hagen, Ø., Johnsen, C. A., Prytz, H., Zhou, B., Nielsen, K. V. og Bjørnevik, M. “The importance of exercise: Increased water velocity improves growth of Atlantic salmon in closed cages”. I: *Aquaculture* 501 (2019), s. 537–546. ISSN: 0044-8486. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.09.057>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0044848618303855>.
- [12] Nilsen, A., Nielsen, K. V., Biering, E. og Bergheim, A. “Effective protection against sea lice during the production of Atlantic salmon in floating enclosures”. I: *Aquaculture* 466 (2017), s. 41–50. ISSN: 0044-8486. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.09.009>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0044848616304537>.
- [13] Noble, C., Nilsson, J., Stien, L., Iversen, M., Kolarevic, J. og Gismervik, K. *Velferdsindikatorer for oppdrettslaks: Hvordan vurdere og dokumentere fiskevelferd*. 2018.
- [14] Oppedal, F., Dempster, T. og Stien, L. H. *Snorkelmerd: Produksjonseffektivitet, adferd og velferd*. 2016. URL: https://imr.brage.unit.no/imr-xmlui/bitstream/handle/11250/2408859/HI-rapp_9-2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [15] Oppedal, F., Dempster, T. og Stien, L. H. “Environmental drivers of Atlantic salmon behaviour in sea-cages: A review”. I: *Aquaculture* 311.1 (2011), s. 1–18. ISSN: 0044-8486. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2010.11.020>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0044848610007933>.
- [16] Remen, M., Oppedal, F., Torgersen, T., Imsland, A. K. og Olsen, R. E. “Effects of cyclic environmental hypoxia on physiology and feed intake of post-smolt Atlantic salmon: Initial responses and acclimation”. I: *Aquaculture* 326-329 (2012), s. 148–155. ISSN: 0044-8486. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2011.11.036>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0044848611009252>.
- [17] Remen, M., Aas, T. S., Vågseth, T., Torgersen, T., Olsen, R. E., Imsland, A. og Oppedal, F. “Production performance of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) postsmolts in cyclic hypoxia, and following compensatory growth”. I: *Aquaculture Research* 45.8 (2014), s. 1355–1366. DOI: <https://doi.org/10.1111/are.12082>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/are.12082>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/are.12082>.
- [18] Sandstad, A. R., Calabrese, S., Holm, S., Karlsen, C. og Storsul, T. *Aquatraz: Sluttrapport for biologiprogram - merdgenerasjon 4 på Årsetfjorden*. Rapport nr. AQT-MNH-BIO-012, rev.0 - konfidensiell. 2021.
- [19] Solstorm, F., Solstorm, D., Oppedal, F., Fernö, A., Fraser, T. og Olsen, R. “Fast water currents reduce production performance of post-smolt Atlantic salmon *Salmo salar*”. I: *Aquaculture Environment Interactions* 7 (sep. 2015), s. 125–134. DOI: 10.3354/aei00143.
- [20] Stene, A., Hellebø, A., Viljugrein, H., Solevåg, S. E., Devold, M. og Aspehaug, V. “Liquid fat, a potential abiotic vector for horizontal transmission of salmonid alphavirus?” I: *Journal of Fish Diseases* 39.5 (2016), s. 531–537. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfd.12382>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/jfd.12382>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfd.12382>.

- [21] Storsul, T., Aunsmo, A., Dalum, A. S., Romstad, S., Urke, H., Calabrese, S. og Larsson, T. *Aquatraz: Halvårsrapport for biologiprogram - merdgenerasjon 2 på Kyrøyene*. Rapport nr. AQT-MNH-BIO-006, rev.0. 2020. URL: <https://vov0h40ndw03lvzox17vd51a-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/sites/10/2021/01/aqt-ag2-halvarsrapport-biologiprogram-2020-06-05-1.pdf>.
- [22] Storsul, T., Aunsmo, A., Dalum, A. S., Romstad, S., Urke, H., Calabrese, S., Larsson, T. og Fjær, M. *Aquatraz: Halvårsrapport for biologiprogram - merdgenerasjon 3 på Årsetfjorden*. Rapport nr. AQT-MNH-BIO-009, rev.0. 2021. URL: <https://vov0h40ndw03lvzox17vd51a-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/sites/10/2021/03/aquatraz-ag3-halvarsrapport-biologiprogram.pdf>.
- [23] Storsul, T., Aunsmo, A., Dalum, A. S., Romstad, S., Urke, H., Calabrese, S., Larsson, T. og Fjær, M. *Aquatraz: Sluttrapport for biologiprogram - merdgenerasjon 2 på Kyrøyene*. Rapport nr. AQT-MNH-BIO-008, rev.0. 2021. URL: <https://vov0h40ndw03lvzox17vd51a-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/sites/10/2021/02/aqt-ag2-sluttrapport-biologiprogram-rev-0-20210122.pdf>.
- [24] Storsul, T., Aunsmo, A., Dalum, A. S., Romstad, S., Urke, H., Åtland, Å. og Larsson, T. *Aquatraz: Sluttrapport for biologiprogram - pilotmerd i Eiterfjorden*. Rapport nr. AQT-MNH-BIO-004, rev.1. Des. 2019. URL: <https://www.fiskeridir.no/Media/Files/akvakultur/tildeling-og-tillatelser/saertillatelser/utviklingstillatelser/kunnskapsdeling/AQT-G1-sluttrapport-biologiprogram-20200123.pdf>.
- [25] Storsul, T., Aunsmo, A., Dalum, A. S., Romstad, S., Urke, H., Åtland, Å. og Larsson, T. *Halvårsrapport for Aquatraz: Program for å dokumentere biologiske resultater i driftsfasen - pilotmerder i Eiterfjorden*. Rapport nr. AQT-MNH-BIO-002, rev.0. 2019. URL: <https://www.fiskeridir.no/media/Files/akvakultur/tildeling-og-tillatelser/saertillatelser/utviklingstillatelser/kunnskapsdeling/Aquatraz-G1-halvaarsrapport-biologiprogram.pdf>.
- [26] Storsul, T., Aunsmo, G., Dalum, A. S., Romstad, S., Urke, H., Calabrese, S., Larsson, T. og Fjær, M. *Aquatraz: Sluttrapport for biologiprogram og tetthetsprogram - merdgenerasjon 3 på Årsetfjorden*. Rapport nr. AQT-MNH-BIO-011, rev.0. 2021. URL: <https://vov0h40ndw03lvzox17vd51a-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/sites/10/2021/10/21-10-sluttrapport-for-biologiprogram-og-tetthetsprogram-merdgenerasjon-3-pa-arsetfjorden.pdf>.
- [27] Storsul, T., Calabrese, S., Dale, T., Fjær, M. og Holm, S. *Aquatraz: Rapport for tetthetsprogram på Kyrøyene*. Rapport nr. AQT-MNH-BIO-007, rev.0. 2020. URL: <https://vov0h40ndw03lvzox17vd51a-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/sites/10/2021/01/aquatraz-rapport-tetthetsprogram-kyroyene.pdf>.