

8005-2024

Ny brønnbåtkunnskap - biologiske risikofaktorer ved bruk av brønnbåt til transport og behandling av laks

NYBRØK - FHF 901788



Rapport

Løpenummer: 8005-2024

ISBN 978-82-577-7742-5
NIVA-rapport
ISSN 1894-7948

Denne rapporten er
kvalitetssikret iht. NIVAs
kvalitetssystem og
godkjent av:

Ole-Kristian Hess-Erga
Prosjektleder/
Hovedforfatter

Åse Åtland
Kvalitetssikrer

Trine Dale
Forskningsleder

© Norsk institutt for
vannforskning.
Publikasjonen kan siteres
fritt med kildeangivelse.

www.niva.no

Norsk institutt for vannforskning

Tittel

Ny brønnbåtkunnskap - biologiske
risikofaktorer ved bruk av brønnbåt til
transport og behandling av laks (NYBRØK -
901788)

Sider

40

Dato

25.09.2024

Forfatter(e)

NIVA: Ole-Kristian Hess-Erga, Sara
Calabrese, Rolf D. Vogt, Endre Steigum,
Frida Sol Svendsen, Kamilla Furseth.
Aqua Kompetanse: Torolf Storsul, Alf
Seljenes Dalum, Silje Stensby-Skjærvik.
UiB: Ivar Rønnestad.
NUI: Kåre Segadal, Kim Løseth.
Seafarming Systems: Alf Reidar Sandstad.
ILAB: Linda Andersen, Susanne Håvardstun
Eide, Reidar Handegård

Fagområde

Akvakultur

Distribusjon

Åpen

Oppdragsgiver(e)

Fiskeri- og havbruksnæringens
forskningsfinansiering AS (FHF)

Kontaktperson hos oppdragsgiver

Renate Johansen og Kjell Maroni

Utgitt av NIVA

Prosjektnummer 220205

Oppdragsgivers utgivelse:

Prosjektnummer 901788

Sammendrag

Moderate (400 µg/l) og høye konsentrasjoner (800 µg/l) av totalsink (Zn) under simulert ferskvannsbehandling med bløtt vann, kan påføre fisken for stor belastning. De fysiologiske responsene er ikke tilstrekkelige til å kompensere for det osmotisk stresset fisken påføres, noe som fører til at fisken dør ved tilbakeføring til sjøvann. Det var imidlertid tydelig at fisken klarte seg bedre i ubehandlet ferskvann med humus, sammenlignet med humus-fattig ferskvann som var tilsatt silikatlut. Simulert lasting viste at lastetid utover en time ved trykkforhold rundt 0,4 ata medførte avvikende adferd, luftbobler i blodomløpet og i finnene, og fiskedød. Den simulerte lossingen på 2,6 ata medførte ingen fiskedød. Adferdsavvik i form av hyperaktivitet, hypoaktivitet og likevektproblemer var en viktig støtte i den kliniske vurderingen ved trykkfallindusert gassbablesyke. Ved måling av totalgass og beregning av totalgassmetning må lufttrykket over vannspeilet benyttes. Mer enn normal metning av en enkeltgass (f.eks. nitrogen) fører ikke nødvendigvis til totalgassovermetning (>100 % TGP) og gassbablesyke. Det er totalgassovermetning som påvirker fisken og kan føre til gassbablesyke.

Emneord: Akvakultur, brønnbåt, TGP, sink

Keywords: Aquaculture, well boat, TGP, zinc

Innholdsfortegnelse

Forord	4
Sammendrag	5
Summary	7
1 Innledning	10
2 Problemstilling og formål	13
3 Prosjektgjennomføring	14
4 Oppnådde resultater, diskusjon og konklusjon	16
5 Hovedfunn	34
6 Referanser	36
7 Leveranser	39

Forord

Prosjekt NYBRØK har pågått fra 19. september 2022 til 25. september 2024 og vært finansiert av Fiskeri- og havbruksnæringens forskningsfinansiering AS (FHF). Prosjektet har vært et samarbeid mellom FoU-partnerne NIVA, Aqua Kompetanse, UiB, Patogen, NUI, Seafarming Systems, ILAB, Akvaplan-niva og næringsaktørene Sølvrans AS, Frøy ASA, Rostein AS, Mowi ASA, Lerøy Seafood Group ASA, SalmoNor AS, SalMar Settefisk AS, Salmon Evolution ASA, Grieg Seafood ASA, Ovum AS og Salmon Group AS. FHF har vært representert ved Renate Johansen og Kjell Maroni. Referansegruppen har bestått av Kristoffer Alnes Røyset, Marius Hamre, Solveig Gaasø, Kari Lillesund og Trond Rosten. Observatører har vært Linn Therese Hosteland og Karoline Skaar Amthor.

Tusen takk for alle bidragene, diskusjonene og et utmerket samarbeid!

Vennlig hilsen

Ole-Kristian Hess-Erga, prosjektleder

Bergen, 25. september 2024

Sammendrag

Transport og behandling av levende laks i brønnbåt kan være risikofyllt, men samtidig en aktivitet som havbruksnæringen er helt avhengig av. De fleste transportene og behandlingene foregår relativt problemfritt, men med ujevne mellomrom rapporteres det om fiskevelferdsutfordringer og dødelighetshendelser. Det pekes på flere mulige årsaker og NYBRØK-prosjektet har hatt som mål å gjennomføre studier for økt forståelse av to faktorer som tidligere er identifisert som mulige risikoer: akkumulerte metaller (sink og kobber) og gassmetning under transport og behandling i brønnbåt. Videre har prosjektet hatt som mål å foreslå konkrete tiltak som kan bidra til vesentlig reduksjon av biologisk risiko.

Prosjektarbeidet startet med en grundig gjennomgang av dødelighetshendelsene som prosjektpartnerne stilte til rådighet (AP 1), for å justere det påfølgende arbeidet. Deretter ble effekter av vannkvalitet, akkumulerte stoffer i vannet (AP 2) og gassmetning (AP 3) på laks under transport og ved behandling i brønnbåt kartlagt, både gjennom kontrollerte forsøk og ved overvåking av kommersielle transporter og behandlinger.

Sink og akkumulerte stoffer

Samlet viser resultatene at høye konsentrasjoner av totalt sink (800 µg/l) under 8-timers transport i sjøvann har effekter på ionereguleringen, men en fisk ved god helsestatus vil sannsynligvis tåle en slik belastning hvis den ikke utsettes for ytterligere belastning etter utsett i sjø. Ved moderate (400 µg/l) og høye konsentrasjoner (800 µg/l) av totalsink under ferskvannsbehandling i 8 timer med bløtt vann, kan den samlede belastningen for fisken bli for stor. Dette er nivåer av sink en har observert under faktiske brønnbåtsoperasjoner. Det ble observert signifikante skader på gjellene og de fysiologiske responsene er ikke tilstrekkelige til å kompensere for det osmotisk stresset fisken påføres, noe som fører til at fisken dør ved ytterligere påkjenninger og håndtering, som ved tilbakeføring til sjøvann. Det var imidlertid tydelig at fisken klarte seg bedre i ubehandlet ferskvann sammenlignet med behandlet ferskvann som var tilsatt silikatlut. Dette skyldes sannsynligvis det ubehandlede vannet på ILAB, der forsøkene ble utført, inneholdt mer humus som binder Zn^{2+} og gjør sink mindre giftig, og ikke i seg selv knyttet til silikattilsetningen.

Det er totalkonsentrasjon av sink og kobber i vannet som er rapportert og som ble målt i forsøkene, siden måling av frie ioner er utfordrende. Totalkonsentrasjonen består både av frie ioner og metallioner kompleksbundet til humus. Det er de frie ionene i løsning som har en giftig effekt på fisken. Vannets hardhet og konsentrasjonen av spesielt kalsiumioner vil påvirke giftigheten. Hvor farlig en gitt totalkonsentrasjon av sink er for fisk er derfor avhengig av vannets kvalitet (innhold av humus, sjøvann, Ca-ioner og pH). Rensing av vannet fjerner mest effektivt de store og fargede humusstoffene. Dette fører til stor endring i fargen til vannet og øker giftigheten til sink ved at en mindre andel Zn^{2+} bindes til humus. I tillegg til humus fra nedbørsfeltet til ferskvannskilden, er vannet også tilført organisk karbon fra fisken, sannsynligvis bestående av slim (for det meste glykoproteiner) og noe avføring. Dette gir liten fargeøkning og har sannsynligvis liten effekt på giftigheten til sink, men gir en signifikant effekt på TOC-verdiene. Det er derfor en del usikkerhetsfaktorer knyttet til tolkingen av sammenhengen mellom TOC, farge og giftigheten av totalkonsentrasjonen av sink i ferskvann. Forsøkene viste også at silikatlut ikke avgifter sink under forhold relevante for brønnbåt. Samlet sett vil den toksiske effekten av fritt Zn^{2+} påvirkes av fiskens helsetilstand, det akkumulerte stresset ved håndteringsoperasjoner og det osmotiske stresset som fisken blir utsatt for ved brå endring av salinitet under ferskvannsbehandling.

Ferskvann produsert ved ultrafiltrering og revers osmose (RO) av sjøvann brukes i økende grad til ferskvannsbehandling av laks i brønnbåter. Dette vannet inneholder en del salt (Na^+ og Cl^-), men lite Ca^{2+}

og Mg^{2+} (bløtt) og ikke noe humus. Hvordan slikt vann påvirker giftigheten av sink, vet vi lite om foreløpig, men dette skal studeres i NYBRØK II.

Trykk og totalgassmetning

De kontrollerte forsøkene simulerte trykkforhold og varighet (tid fra første til siste fisk er lastet/losset) i ytterkant av det som benyttes i brønnbåter, hvor fisk og vann suges om bord (lasting) og føres ut igjen ved hjelp av økt trykk (lossing). Resultatene viser at lastetid utover en time ved trykkforhold rundt 0,4 ata medfører kliniske symptomer på gassboblesyke og kan gi fiskedød. Andelen fisk med avvikende adferd og bobler i blodomløpet og i finnene, økte med eksponeringstiden (60 til 113 minutter) ved 0,4 ata. En høy andel av fisken posisjonerte seg lavt i vannsøylen ved dette trykket. Adferdsavvik i form av hyperaktivitet, hypoaktivitet og likevektproblemer var en viktig støtte i den kliniske vurderingen ved trykkfallindusert gassboblesyke. Omfattende bobledannelse var alltid assosiert med fiskedød. Forsøkene viser også at dødelighet forårsaket av trykkfallindusert gassboblesyke er vanskelig å avdekke i ettetid. Visuell inspeksjon av særlig finner og til dels gjeller kan gi nyttige indikasjoner og ultralyd viste seg å være meget effektivt for å påvise gassbobler i systemisk sirkulasjon. Ovennevnte viser at laks kan utvikle trykkfallsyke ved trykkforhold og varighet som er relevante for næringen. Laks tåler tilsynelatende lossing (komprimering) under testede trykkforhold bedre. Den simulerte lossingen på 2,6 ata medførte ingen fiskedød og hadde normal adferd under eksponeringene. Ultralyd er gullstandarden for diagnostikk av gassbobler ved dykkersyke hos mennesker, og det samme ser ut til å gjelde for trykkfallindusert gassboblesyke hos fisk. Angiotensinkonverterende enzym, hematokrit, hemoglobin og skåret exoptalmus ga lite eller ingen diagnostisk verdi ved akutt trykkfallsyke. Det var også dårlig sammenheng mellom kliniske utslag og funn på histologiske undersøkelser.

Det ble også identifisert usikkerhet og forvirring knyttet til måling av gasser i vann og begrepene som benyttes når overmetning diskuteres. Dette kan føre til usikkerhet om i hvilken grad vannet er gassovermettet og hvordan dette påvirker fisken. Dersom trykket i luftlommen i brønnbåtens tank reduseres eller økes og ikke lenger er likt barometrisk trykk, vil det ikke lenger være praktisk mulig å ha avlesingsenheten/instrumentet i denne luftlommen. Men det er likevel det aktuelle lufttrykket i denne luftlommen som må legges til grunn for beregning av totalgassmetningen. Et annet viktig poeng og en utbredt misforståelse er at overmetning av nitrogengass alene fører til gassboblesyke. Det er totalgassovermetning som er grunnlaget for gassboblesyke og da er metningen av enkeltgasser underordnet. Dette poenget kan illustreres ved at det er fullt mulig å ha mer enn normal metning av en enkeltgass (f.eks. nitrogen) så lenge summen av deltrykkene (partialtrykkene) til alle gassene i vannet, ikke gir en totalgassovermetning. Så lenge ΔP er mindre enn eller lik null, (TGP (%) mindre enn eller lik 100) er det ikke mulighet for bobledannelse. I en slik situasjon er det ikke grunnlag for bobledannelse. Likevel indikerer enkelte studier at et høyere oksygen til nitrogen forhold kan gjøre at fisk tolererer en situasjon med totalgassovermetning noe bedre, men det er likevel slik at grad av totalgassovermetning og tid fisken utsettes for totalgassovermetningen er langt viktigere for det kliniske utfallet enn balansen mellom enkeltgasser.

Feltstudier av brønnbåtoperasjoner viste ultralydfunn og/eller makroskopiske funn av gassbobler hos laks, men da senere i prøveuttaksskjeden enn ved første undersøkelse etter sedasjon. Det pekes mot at gassbobler kan forekomme som artefakt, men økt forekomst av gassbobler i feltundersøkelsen med størst totalgassmetning gjør at gassboblesyke ikke kan utelukkes som en forklaring i enkelte av tilfellene.

Teknisk og operasjonelt er det identifisert flere mulige tilnærminger til tiltak som kan iverksettes både på eksisterende brønnbåter og nybygg, for å bidra til å redusere utfordringer med trykkendringer og totalgassovermetning.

For å identifisere veiledende grenseverdier (tid og trykk) i ulike relevante scenarier, må det gjennomføres flere studier hvor eksponeringstid som funksjon av trykk vurderes. I tillegg bør tiltak som rekomprimering av fisken undersøkes, da dette kan tilsvare behandlingen som dykkere med trykkfallssyke får, og består i at dykkeren blir “blåst ned”/trykksatt på nytt til et gitt behandlingsdyp i trykkammer. Rekomprimering uten at det foreligger trykkfallssyke brukes også i spesielle dykkeprosedyrer, som kalles overflatedekompresjon. Rekompresjon kurativt eller som forebygging (profylakse) kan være mulig i brønnbåter.

Summary

Transport and salmon lice treatment of live salmon in a well boat can be risky, but at the same time an activity on which the aquaculture industry is completely dependent. Most of the transports and treatments take place relatively problem-free, but at irregular intervals there are reports of fish welfare challenges and mortality incidents. Several possible causes are pointed out and the NYBRØK project has aimed to carry out studies for increased understanding of two factors that have previously been identified as possible risks: accumulating metals (zinc and copper) and gas supersaturation during transport and treatment in a well boat. Furthermore, the project has aimed to propose concrete measures that can contribute to a significant reduction of biological risk.

The project work started with a thorough review of the mortality events that the project partners made available (AP 1), in order to adjust the subsequent work. Subsequently, the effects of water quality, accumulative substances in the water (AP 2) and gas supersaturation (AP 3) on salmon during transport and during treatment in a well boat were mapped, both through controlled trials and by monitoring commercial transport and treatments.

Zinc and accumulated substances

Overall, high concentrations of total zinc (800 µg/L) during an 8-hour transport in seawater affects ion regulation in the gill of the fish. However, a fish in good health has the ability to compensate for this if not subjected to additional stress after transfer back to sea cages. The results also indicate that at moderate (400 µg/L) and high concentrations (800 µg/L) of total zinc during an 8-hour freshwater treatment with soft water, the total cumulative stress burden has exceeded the fishes physiological coping ability. These are levels of total zinc that have been observed during actual wellboat operations. Significant gill damage was observed, and the physiological responses mounted in response to elevated zinc levels were not sufficient enough to compensate for the osmotic stress the fish was subjected to, which lead to mortality when fish were returned to seawater. However, it was clear that the fish handled elevated zinc levels better in untreated freshwater compared to treated freshwater to which silicate hydroxide had been added. This is probably because the untreated water at ILAB, where the experiments were carried out, contained more humic substances which binds Zn^{2+} and makes zinc less toxic, and is not in itself linked to the addition of silicate.

It is the total concentrations of zinc and copper in the water that has been measured during the experiments and reported from commercial well boat operations, since measurements of the free ions of these metals is challenging. In freshwater, the total concentration consists of both free ions and metal ions complexed to humic substances. It is the free ions in the solution that can have toxic effects on fish. The hardness of the water and the concentration of calcium ions in particular, will affect the toxicity. How dangerous a given total concentration of zinc is for fish therefore depends on the quality of the water (content of humic substances, seawater, Ca ions and pH). Purification of the water most effectively removes the large and coloured humic substances. This leads a reduction in water colour and increases the toxicity of zinc as a smaller proportion of the Zn^{2+} has the possibility to bind to humic substances. In

addition to humic substances from the catchment area of the freshwater source, the water is also supplied with organic carbon from the fish, probably consisting of mucus (mostly glycoproteins) and some faeces. Such organic matter has little effect on water colour and likely the toxicity of zinc, but significantly increases TOC values. Therefore, there are several uncertainties linked to the interpretation of the relationship between TOC, colour and the toxicity of the total concentration of zinc in freshwater. The tests also showed that silicate hydroxide does not detoxify zinc under conditions relevant to well boats. Overall, the toxic effect of free Zn^{2+} will be influenced by the health condition of the fish prior to treatment, the accumulated stress during handling operations and the osmotic stress to which the fish are exposed by sudden changes in salinity during freshwater treatment.

Freshwater produced by ultrafiltration and reverse osmosis (RO) of seawater is increasingly used for freshwater treatment of salmon in well boats. This water contains some salt (Na^+ and Cl^-), but little Ca^{2+} and Mg^{2+} (soft) and no humic substances. We currently know little about how such water affects the toxicity of zinc, but this will be studied in NYBRØK II.

Pressure and total gas saturation

The controlled experiments simulated pressure conditions and duration (time from the first to the last fish being loaded/unloaded) at the extremes of what is used in wellboats, where fish and water are pumped on board (loading) and unloaded using pressure (unloading). The results show that loading times beyond one hour at pressure conditions of around 0.4 ata cause clinical symptoms of gas bubble disease and may cause fish death. The proportion of fish with abnormal behaviour and bubbles in the bloodstream and fins increased with exposure time (60 to 113 minutes) at 0.4 ata. A high proportion of the fish positioned themselves low in the water column at this pressure. Behavioural abnormalities in the form of hyperactivity, hypoactivity and buoyancy problems were important to support the clinical assessment of decompression-induced gas bubble disease. Extensive bubble formation was always associated with fish mortality. The experiments also showed that mortality caused by decompression-induced gas bubble disease is difficult to uncover afterwards. Visual inspection of particularly fins and partly gills can provide useful indications. Ultrasound proved to be very effective in detecting gas bubbles in systemic circulation. The above-mentioned points shows that salmon can develop decompression sickness at pressure conditions and duration that are relevant for the industry. Salmon apparently tolerate better the tested unloading (compression) pressure conditions. The simulated unloading of 2.6 ata resulted in no fish mortality and the fish showed normal behaviour during the exposures. Ultrasound is the gold standard for diagnosing gas bubbles disease in humans, and the same seems to apply to decompression induced gas bubble disease in fish. Angiotensin-converting enzyme, haematocrit, haemoglobin and scored exophthalmos gave little or no diagnostic value in acute gas bubble disease. There was also a poor correlation between clinical results and findings on histological examinations.

There was some uncertainty and confusion in the industry related to the measurement of gases in water and the terms used when discussing supersaturation. This can lead to uncertainty about the extent to which the water is gas supersaturated and how this affects the fish. If the pressure in the air pocket in the well boats tank is reduced or increased and is no longer equal to barometric pressure, it will no longer be practically possible to have the reading unit/instrument in this air pocket. However, it is still the current air pressure in this air pocket that must be used as a basis for calculating the total gas saturation. Another important point and a widespread misunderstanding is that supersaturation of nitrogen gas alone leads to gas bubble disease. It is the total gas supersaturation that is the basis for gas bubble disease and therefor the saturation of individual gases is subordinate. This point can be illustrated by the fact that it is possible to have more than normal saturation of a single gas (e.g. nitrogen) as long as the sum of the partial pressures (partial pressures) of all the gases in the water does not give a total gas supersaturation. As long as ΔP is less than or equal to zero, (TGP (%) less than or equal to 100) there is no possibility of bubble formation. In such a situation there is no basis for bubble formation. Nevertheless, some studies

indicate that a higher oxygen to nitrogen ratio can make fish tolerate a situation with total gas supersaturation somewhat better. However, the degree of total gas supersaturation and the time the fish is exposed to the total gas supersaturation are far more important for the clinical outcome than the balance between individual gases.

Field studies of well boat operations showed ultrasound findings and/or macroscopic findings of gas bubbles in salmon, but later in the sampling period than at the first examination after sedation. It is possible that such gas bubbles may occur as an artefact, but an increased occurrence of gas bubbles in the field survey with the highest total gas saturation supports that gas bubble disease cannot be ruled out as an explanation in some of the cases.

Technically and operationally, several possible approaches to measures have been proposed in the project that can be implemented both on existing well boats and new builds, to help reduce challenges with pressure changes and total gas supersaturation.

To identify indicative threshold values (time and pressure) in various relevant scenarios, several studies must be carried out in which exposure time as a function of pressure is assessed. In addition, measures such as recompression of the fish should be investigated, as this may correspond to the treatment that divers with decompression sickness receive and consists of the diver being "blown down"/recompressed to a given treatment depth in a pressure chamber. Recompression without the presence of decompression sickness is also used in special diving procedures, which are called surface decompression. Curative or preventive (prophylaxis) recompression may be possible in wellboats.

1 Innledning

Både transport, behandling og trenging av laks har vist seg å være en velferdsrisiko for oppdrettsfisk (VKM 2008, Rosten 2010, Tang mfl. 2009, Espmark mfl. 2015, 2016, Noble mfl. 2018 mfl.). Transport og behandling av levende laks i brønnbåt kan være risikofylt, men samtidig en aktivitet som havbruksnæringen er helt avhengig av. I næringens barndom var fartøyene relativt enkle og små, med lave løftehøyder og lite eller ingen vannbehandling. Kontrasten er stor til dagens brønnbåter som er større, har komplekse laste- og lossesystemer og avansert vannbehandling.

De fleste transportene og behandlingene foregår relativt problemfritt, men med ujevne mellomrom rapporteres det om fiskevelferdsutfordringer og dødelighetshendelser. Foreløpig erfaring og kunnskap ble innhentet gjennom 20-30 enkeltstående rapporter/notater som næringen hadde fått utført i samarbeid med herværende FoU-deltagere (hendelsesrapporter) og gjennom et innspillsmøte den 9. mars 2022 med 30 deltagere fra næringen. Både hendelsesrapportene og innspillene pekte på flere mulige årsaker; kvalitet på vannet som tas om bord (bl.a. organisk materiale, metaller, H_2S , lagringslengde), transport/behandling av svekket fisk (helseattest, fiske-CV, fiskestørrelse/-stadium), høy fiskebiomasse/tetthet, utstyr i brønnbåten som avgir metaller (sink og kobber) eller påvirker vannet i ugunstig retning (f.eks. totalgassmetning), lav eller ingen vannutskifting og gjenbruk av behandlingsvann (akkumulering av metaller, organisk materiale, nitrogenforbindelser og mikrober), transport- og behandlingens lengde, mangelfulle rutiner/kontroll/overvåking (bl.a. rester av desinfeksjonsmidler/vaskemidler, forhøyet CO_2 -nivå/lav pH, høy oksygenmetning) eller en kombinasjon av disse. Felles for uheldige påvirkninger fra disse faktorene på fisken er at de kan være utfordrende å diagnostisere med metodene som rutinemessig benyttes i dagens oppdrett. Flere av disse utfordringene finnes også i andre lukkede og semilukkede system. Her er derfor gjensidig kunnskapsoverføring viktig for å redusere biologisk risiko.

Vannkvalitet og akkumulerte stoffer i vannet

Ved lasting av fisk er tankene om bord i brønnbåten fylt med vann. Kvaliteten på dette vannet må være god, enten det er ferskvann, brakkvann eller sjøvann. Ferskvannsbehandling mot lus og amøber kan bl.a. påvirkes av uønsket sjøvann som både kan forårsake lav behandlingseffektivitet, fare for H_2S -dannelse ved lagring av ferskvann og at metaller kan endre tilstandsform og bli mer toksiske for fisk. Det ser også ut til at totalkonsentrasjonen av sink akkumuleres til svært høye nivå i brønnbåter og at andre metaller (bl.a. aluminium) blir tilført via ferskvannet (opp mot akutt toksiske verdier i henhold til flere undersøkelser). Det stilles derfor spørsmål om buffertilsetning og silikatbehandling av ferskvannet er tilstrekkelig for å opprettholde god fiskevelferd og om noen av de registrerte hendelsene/dødelighetene kan knyttes til giftige metaller. Det er de frie kationene til Zn^{2+} og Cu^{2+} som har toksisk virkning. Mengden av disse kationene i forhold til totalkonsentrasjonen i ferskvann er i stor grad bestemt av mengden humus i vannet. I tillegg til humus fra ferskvannskilden er vannet også tilført organisk karbon fra fiskens slim. Mengden organisk materiale i vannet er derfor ofte høyt under ferskvannsbehandling og transporter sammenlignet med normale driftsformer i næringen. Slimet gir liten fargeøkning og har sannsynligvis liten effekt på giftigheten til sink. Det er derfor en del usikkerhet knyttet til tolkingen av sammenhengen mellom TOC, farge og giftigheten av totalkonsentrasjonen av sink i ferskvann. I tillegg kan lasting og lossing av fisk uten avsiling av produksjons-/transportvann føre til rask pH stigning ved overførsel til sjøvann, som igjen påvirker tilstandsformen til en rekke stoffer i vannet og da spesielt avfallsproduktet ammonium. Slike forhold kan både medføre akutt dødelighet og påvirke fisken negativt senere i livet (se bl.a. de årlige Fiskehelserapportene).

Trykkendringer, totalgassmetning og trykkfallssyke

Det totale gasstrykket i vannet forkortes TGP (total gas pressure). Dette defineres som summen av partialtrykkene til alle gasser i væskefasen. For å regne ut totalgassmetning må man også måle det «barometriske trykket» eller lufttrykket over vannspeilet, forkortet BP (barometric pressure). Dette er definert som summen av partialtrykkene til alle gasser i gassfasen/luften. Differansen mellom disse to trykkene kalles differensialtrykket ΔP (TGP-BP). Med denne informasjonen kan man regne ut totalgassmetningen, TGP (%) (Colt 1983):

$$\text{TGP (\%)} = \frac{\text{BP} + \Delta P}{\text{BP}} \times 100$$

Ettersom $\Delta P = (\text{TGP} - \text{BP})$, ser man at likningen for utregning av totalgassmetningen kan forenkles til:

$$\text{TGP (\%)} = \frac{\text{TGP}}{\text{BP}} \times 100$$

I en del litteratur finner man også begrepet total dissolved gas (TDG), som brukes synonymt med TGP.

En brønnbåt som laster ved å suge opp vann og fisk fra merden til en høyde over havoverflaten, vil senke lufttrykket for å muliggjøre løftehøyden. Dette tilsvarer å senke BP i likningen over, og dersom vannet hadde 100 % totalgassmetning i utgangspunktet vil det resultere i en totalgassovermetning som blir større desto høyere løftehøyden er. Eksempelvis vil vann med totalgassmetning på 100 % i overflaten ved 1 atmosfære absolutt trykk (ata), allerede ved 4 meter sugedybde få 167 % metning (tilsvarer 0,6 ata). Fiskens blod og vevsvæsker vil oppleve omtrent tilsvarende endringer i gassmetning om trykket endres. Ved pumping hvor det benyttes undertrykk (uttrykk brukt i akvakulturnæringa om lavere trykk enn atmosfærisk trykk) vil dermed både vannet og fisken bli overmettet i økende grad ved økende løftehøyde. Endringen i totalgassmetning skjer umiddelbart ved endret trykk. Ved totalgassovermetning kan gassbobler dannes, og sannsynligheten øker som en funksjon av varighet og grad av overmetning. Dersom det dannes bobler i fiskens blod eller vevsvæsker kalles tilstanden gassboblesyke. En underkategori av gassboblesyke hvor gassbobledannelsen skyldes trykkfall kalles trykkfallssyke (decompression sickness).

Det foreligger betydelig kunnskap om gassboblesyke hos fisk ved atmosfærisk trykk (bl.a. Pulg mfl. 2018, Speare 2010, Weitkamp & Katz 1980), mens underkategorien trykkfallssyke hos fisk er dokumentert i mindre grad selv om det finnes enkelte publiserte studier (bl.a. Beyer mfl. 1976, D'Aoust & Smith 1974). Likevel er det grunn til å tro at effekten av gassboblesyke på fisk ved atmosfærisk trykk og trykkfall, til en viss grad er sammenlignbar. Akutte skader kan oppstå som en følge av gassboblesyke, men det er viktig å være klar over at skader etter gassbobler i sirkulasjon også kan opptre lang tid etter eksponering. I kontrollerte forsøk ved atmosfærisk trykk har det blitt vist av dødelighet først inntrådte flere dager etter gassovermetning i vannet (f.eks. Machado mfl. 1987). En viktig mekanisme bak kroniske forandringer er skader på endotel som følge av gassembolier, med påfølgende anoksiske skader, aktivering av immunsystem og trombedannelser. Det er blant annet kjent at fisk som har gjennomgått gassboblesyke er utsatt for utvikling av sekundære infeksjose sårskader i hud og gjeller (Speare 2010, Huchzermeyer 2003), nedsatt og avvikende tilvekst (Batzios mfl. 1998), og akutte og kroniske skader i øye (Speare 2010). Gjeller har blitt mindre undersøkt, men anekdotiske funn fra rutinediagnostikk viser hyppig forekomst av gassbobler og trombedannelser i ytre del av filamentene, noe som mistenkes å ha sammenheng med trykkfallssyke.

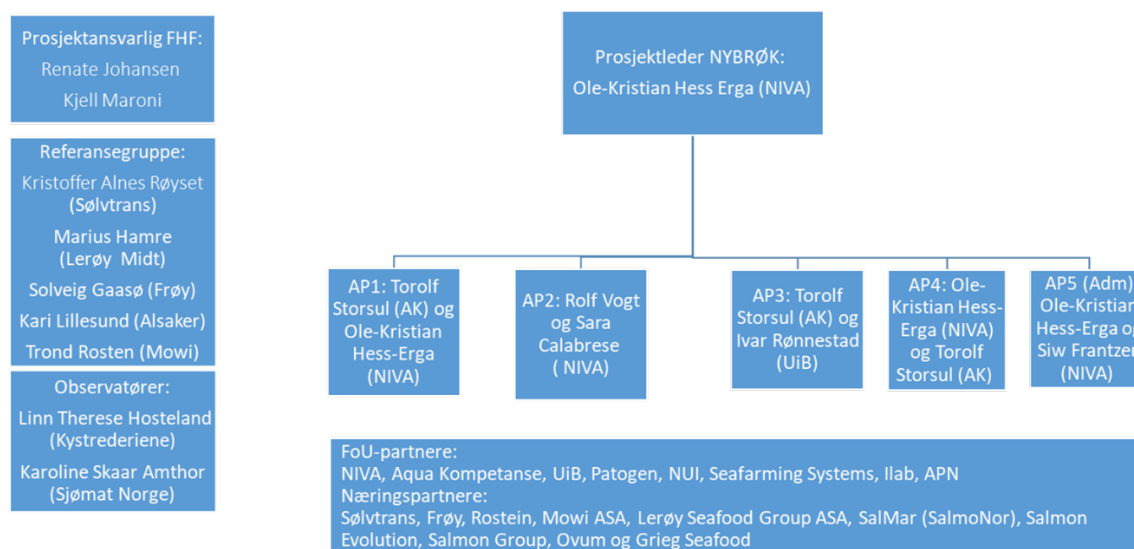
Undertrykk som isolert pumpefaktor ble undersøkt i studien «Pumping av torsk og laks, faktorer som påvirker velferd og kvalitet» (Espmark mfl. 2012). Det konkluderes med at undertrykk i seg selv ikke

forårsaker skader på fisken. Imidlertid er det ikke beskrevet inngående undersøkelser av relevante vev på ulike tidspunkt etter eksponering for undertrykk, dette er heller ikke beskrevet i en senere studie «Pumping og håndtering av smolt» (Espmark mfl. 2015). Flere studier peker bl.a. på følgende utfordringer ved deteksjon av gassovermetning og trykkfallssyke hos fisk; variable og inkonsistente tegn på eksponering, store individuelle variasjoner i følsomhet og utilstrekkelig kunnskap om forholdet mellom eksponering, tegn og dødelighet (Pleizier mfl. 2020, Mesa mfl. 2000, Weitkamp & Katz 1980 mfl.). Temperatur har stor betydning for løselighet av gasser i vann, og termisk avlusing kan derfor medfører betydelig totalgassovermetning i behandlingsvannet, med påfølgende negative konsekvenser for fisken i form av gassbølesyke. Denne problematikken er ikke utfyllende undersøkt eller beskrevet i dokumentasjon knyttet til termisk avlusing (f.eks. Grøntvedt mfl. 2015, Roth 2016).

Ovennevnte har vært den faglige bakgrunnen for NYBRØK-prosjektet som har pågått siden 19. september 2022 til avslutningen 25. september 2024 og vært fullfinansiert av Fiskeri- og havbruksnæringens forskningsfinansiering AS (FHF). Prosjektarbeidet begynte med en grundig gjennomgang av dødelighetshendelsene som prosjektpartnerne stilte til rådighet (AP 1) for å justere det påfølgende arbeidet. Deretter ble effekter av vannkvalitet, akkumulerte stoffer i vannet (AP 2) og gassmetning (AP 3) på laks under transport og ved behandling i brønnbåt kartlagt, både gjennom overvåking av transporter og behandlinger, samt kontrollerte forsøk. Resultatene fra AP 2 og 3 ble deretter integrert og oppsummert i AP 4 for å illustrere sammenhenger mellom laksens velferd/helse, vannkvalitet og gassmetning, samt foreslå tiltak for å redusere biologisk risiko før, under og etter transport og behandling i brønnbåt.

Forsøkene ble gjennomført ved Industrielaboratoriet (ILAB) og NUI AS (NUI). ILAB stilte nødvendig fisk til rådighet for alle eksponeringsforsøkene (både ved ILAB og NUI) og holdt fisk for overvåking av senskader etter eksponering. Forsøkene ble godkjent av Mattilsynet med bakgrunn i FOTS-søknad.

Prosjektet har vært et samarbeid mellom NIVA, Aqua Kompetanse, UiB, Patogen, NUI, Seafarming Systems, Ilab, APN og næringsaktørene Sølvtrans AS, Frøy ASA, Rostein AS, Mowi ASA, Lerøy Seafood Group ASA, SalmoNor AS, SalMar Settefisk AS, Salmon Evolution ASA, Grieg Seafood ASA, Ovum AS og Salmon Group AS (Figur 1).



Figur 1: Prosjektorganisering, -roller og -ansvar i prosjektet NYBRØK.

2 Problemstilling og formål

Ny kunnskap om biologisk risiko og effekter på fisk under transport og ved behandling i brønnbåt vil kunne føre til optimaliserte prosedyrer/praksis, og dermed lavere dødelighet, både under og i etterkant av operasjonene. I tillegg vil ny kunnskap på dette området muliggjøre utvikling av feltdiagnostikk, ha overføringsverdi til operasjoner i lukkede-/semilukkede systemer og settefiskanlegg. Samlet vil slik kunnskap bidra vesentlig til reduserte kostnader, forbedret fiskevelferd/-helse og økt bærekraft i hele næringen.

Prosjektets hovedmål var derfor å gjennomføre nye studier for økt forståelse av relevante problemstillinger der dagens eksisterende kunnskap ikke er tilstrekkelig, for å utvikle konkrete tiltak som kan iverksettes for å oppnå vesentlig reduksjon av biologisk risiko ved bruk av brønnbåt til transport eller behandling. Det ble delt opp i følgende delmål:

- 1) Sammenstille og evaluere de mest relevante dødelighetshendelser under transport og ved behandling av laks i brønnbåt for å illustrere likheter og forskjeller, for dermed kunne designe overvåkingsprogram og målrettede forsøk.
- 2) Karakterisere effekten av vannkvalitet og akkumulerte stoffer i vannet, på laks under transport og ved behandling i brønnbåt.
- 3) Karakterisere hvordan gassmetning og trykk før, under og etter transport og behandling i brønnbåt påvirker laksens velferd, helse og prestasjon, også etter den første tiden i sjøen.
- 4) Integrere resultatene fra delmål 1 – 3 for å kunne illustrere sammenhenger mellom laksens velferd/helse, vannkvalitet og gassmetning, samt foreslå tiltak for å redusere biologisk risiko før, under og etter transport og behandling i brønnbåt

3 Prosjektgjennomføring

Prosjektarbeidet har vært bygget opp rundt delmålene og begynte med en grundig gjennomgang av dødelighetshendelsene som prosjektpartnerne stilte til rådighet (AP 1), for å justere det påfølgende arbeidet. Deretter ble effekter av vannkvalitet, akkumulerte stoffer i vannet (AP 2) og gassmetning (AP 3) på laks under transport og ved behandling i brønnbåt kartlagt, både gjennom kontrollerte forsøk og ved overvåking av transporter og behandlinger. Resultatene fra AP 2 og 3 ble deretter integrert og oppsummert i AP 4 for å illustrere sammenhenger mellom laksens velferd/helse, vannkvalitet, metallkonsentrasjoner og gassmetning, samt foreslå tiltak for å redusere biologisk risiko før, under og etter transport og behandling i brønnbåt.

3.1 Gjennomgang av dødelighetshendelser for å justere feltundersøkelsene og målrettede forsøk (AP 1)

Deltagende næringspartnere og FoU-miljø har sammen undersøkt en rekke dødelighetshendelser og identifisert flere mulige årsaker til fiskedød og svekket fisk under transport- og behandlingsoperasjoner i brønnbåt. Undersøkelsene er ofte initiert i løpet av selve hendelsene og kan være mangelfulle. Det har derfor blitt gjennomført en grundig gjennomgang av de mest relevante dødelighetshendelsene for å kunne designe best mulig feltundersøkelser og målrettede forsøk, og derigjennom kunne avdekke årsakssammenhenger, effekter på fisk og tiltak for redusert biologisk risiko. Dette arbeidet ble ledet av Torolf Storsul (AK) i samarbeid med Ole-Kristian Hess-Erga (NIVA) og partnerne AK, NIVA, APN, Patogen og alle involverte næringspartnere. Funnene ble vurdert og analysert tverrfaglig for å undersøke sammenhenger mellom de ulike dødelighetshendelsene.

3.2 Effekt av vannkvalitet og metallkonsentrasjoner under transport og behandling (AP 2)

En rekke undersøkelser har avdekket unormalt høye totalkonsentrasjoner av sink og kobber, overmettet vann, forhøyet konsentrasjon av nitrogenforbindelser, H₂S og rester av vaskemidler/desinfeksjonsmidler i forbindelse med dødelighetshendelser. Hva som er normalen, hva fisken tåler og hvordan fiskehelsestatus påvirker utfallet, er i mindre grad studert. Det er derfor blitt samlet inn kvalitativ og kvantitativ informasjon om effekten av vannkvalitet og akkumulerte stoffer i vannet på laks før, under og etter transport og behandling i brønnbåt, både gjennom kontrollerte forsøk hvor effekten av totalkonsentrasjoner av sink (Zn) og kobber (Cu) ble testet (AP 2.1) og feltundersøkelser (AP 2.2). Dette arbeidet ble ledet av Sara Calabrese i samarbeid med Rolf D. Vogt (begge NIVA) og partnerne NIVA, AK, Patogen, ILAB og næringspartnerne. Fysisk-kjemiske vannanalyser (laboratorieanalyser og online-sensorikk), fiskehelse- og velferdsindikatorer som primære (plasma og vannkortisol), sekundære stressresponser (plasmaioner, hematokrit, blodglukose og laktat), operative morfologiske velferdsindikatorer (FISHWELL-skåringskjemaet), undersøkelse av gjeller (semi-kvantitativ gjellescore) og histologiske studier (gjelle, lever og nyre), samt konsentrasjon av kobber (Cu), sink (Zn), aluminium (Al) og jern (Fe) på gjellene ble undersøkt i de kontrollerte forsøkene og i relevante feltundersøkelser for å få et helhetlig bilde, og for å studere effekten av akkumulerte stoffer i vannet (enkeltvis og i kombinasjon) på laks.

3.3 Gassmetning i vann og effekt på laks under transport og ved behandling i brønnbåt (AP 3)

Eksisterende kunnskap relevant for trykfallssyke hos laks ble gjennomgått og vurdert i en tverrfaglig gruppe med kompetanse innen vannfag, human- og fiskefysiologi, klinisk og diagnostisk veterinærmedisin, dykkemedisin (human), brønnbåtteknologi, samt praktisk kompetanse fra relevante arbeidsoperasjoner (AP 3.1). Videre ble det utført kontrollerte forsøk (AP 3.2) for å etablere bedre forståelse for mulige konsekvenser av ulike scenarier som er relevant for praktiske operasjoner med brønnbåt. Dette dannet igjen grunnlaget for feltstudiene (AP 3.3) hvor det ble etablert og gjennomført feltrelevant logging og diagnostikk, og mulighet til å finne samsvar mellom kontrollerte forsøk og funn gjort under kommersielle forhold. Dette arbeidet ble ledet av Torolf Storsul (AK) i samarbeid med Ivar Rønnestad (UiB) og partnerne AK, UiB, Patogen, NUI, NIVA, Seafarming Systems og ILAB. Diagnostiske undersøkelser av fisk ble utført i form av observasjon av gassbobler (direkte, lupe, mikroskopi, ultralyd), adferdsanalyser, analyser av endotelskader med biomarkøren angiotensin konverterende enzym, undersøkelse av fysiologiske stressresponser i blod (hematokrit, hemoglobin), operative morfologiske velferdsindikatorer (FISHWELL-skåringskjemaet), undersøkelse av gjeller (semi-kvantitativ gjellescore), histologi av relevante organer og måling av fysiske faktorer i vannet (temperatur, gassmetning, trykk) ble benyttet i de kontrollerte forsøkene, for å studere effekten av gassmetning og trykkforhold på laks. I feltstudiene ble et utvalg parametere fokusert på ut fra hva som var gjennomførbart og hva som ble vurdert som mest relevant for feltforhold, ut fra resultatene i de kontrollerte forsøkene.

3.4 Integrere resultater fra AP 2 og AP 3 for å illustrere sammenhenger mellom laksens velferd/helse, vannkvalitet og gassmetning, samt foreslå tiltak for å redusere biologisk risiko før, under og etter transport og behandling i brønnbåt (AP 4)

For å få en bedre forståelse av hva som kan redusere biologisk risiko under brønnbåtoperasjoner og etter overførsel til sjø ble resultatene fra AP 2 og 3 integrert. Dette arbeidet ble ledet av Ole-Kristian Hess-Erga (NIVA) i samarbeid med Torolf Storsul (AK) og partnerne NIVA, AK, Patogen, NUI, UiB, Seafarming Systems og APN. Ulike statistiske metoder ble brukt for å undersøke sammenhenger mellom laksens velferd/helse, vannkvalitet, gassmetning og operasjonelle faktorer for å foreslå tiltak og operasjonelle prosedyrer som reduserer biologisk risiko ved transport og behandling av laks i brønnbåt. Ut fra kunnskapsgrunnlaget ble det foreslått prinsipielle tekniske løsninger for å forbedre situasjonen på eksisterende brønnbåter og faktorer som må hensyntas under design av nye brønnbåter.

3.5 Prosjektorganisering, administrasjon og formidling (AP 5)

En god prosjektorganisering har bidratt til en effektiv gjennomføring hvor elementene ble belyst og formidlet rask og nøyaktig til forskermiljø og næringen. Dette arbeidet ble ledet av Ole-Kristian Hess-Erga (NIVA) i samarbeid med Siw Frantzen (begge NIVA) og bidrag fra alle partnerne. Alle møter, kommunikasjon, dokumenter, presentasjoner, publikasjoner og data ble delt gjennom prosjektets Teams-kanal. Det er også opprettet egen prosjektside på NIVA.no. Resultatene ble formidlet både som populærvitenskapelige artikler, presentasjoner og vitenskapelige manuskript.

4 Oppnådde resultater, diskusjon og konklusjon

Underkapitlene representerer alle delmålene i prosjektet og funnene svarer samtidig ut delmålene. Delmålene er i stor grad oppnådd og det er identifisert tiltak som er og kan iverksettes for å oppnå hovedmålet; vesentlig reduksjon av biologisk risiko ved bruk av brønnbåt til transport eller behandling. I tillegg er det identifisert områder hvor det fremdeles mangler kunnskap og foreslått nye undersøkelser for å identifisere veiledende grenseverdier og nye tiltak.

4.1 Gjennomgang av dødelighetshendelser for å justere feltundersøkelsene og målrettede forsøk

Arbeidet med innhenting av mer relevant informasjon fra hendelsene var vanskelig og avslørte ofte manglende systematisk logging og mangelfull evaluering. Hendelsene kommer oftest uventet, og undersøkelsene blir først initiert under selve hendelsen eller i etterkant. Begge deler resulterer dessverre i mangelfulle data. Gjennomgangen bekreftet videre at årsakene som industrien og FoU-partnerne pekte på før oppstart av prosjektet, sannsynligvis var gyldige fremdeles. Denne kunnskapen er i stor grad oppsummert i Brønnbåtveilederen (<https://bronnbatveilederen.no/>), både som erfaringsbaserte innspill og erfarte episoder (caser). Resultatene ble også brukt til å definere de målrettede forsøkene og feltundersøkelsene.

4.1.1. Undersøke mulige kilder til forhøyede metallkonsentrasjoner og sammenhenger/ samvirkning med andre vannkvalitetsparametere

Hovedkilden til forhøyede sinkkonsentrasjoner i brønnvann er med stor sannsynlighet sinkanoder. Andre kilder til sink i brønnbåter kan være annen korrosjonsbeskyttelse i form av sink-holdig maling og galvanisert stål. Næringen har undersøkt om sinkkonsentrasjonene øker uten at det er fisk til stede og effekten av å redusere mengden sinkanoder. De fant at sinkkonsentrasjonen øker over tid selv om det ikke er fisk om bord og at færre sinkanoder ikke nødvendigvis reduserer sinkkonsentrasjonen i vannet. Sistnevnte kan indikere at de ulike sinkanodene kan frigi ulike mengder sink til vannet, sannsynligvis avhengig av elektrokjemien rundt disse anodene.

Det finnes flere alternativer til offeranoder av sink og de to mest brukte er aluminiumsanoder eller påtrykt spenning. Et annet alternativ er mer kostbare malingssystemer som gir tilstrekkelig beskyttelse uten bruk av anoder. Det kan se ut som valg av systemer/løsninger i liten grad har vært risikovurdert ut fra fiskehelsemessige hensyn. Noe av grunnen til dette kan være den generelle mangel på vitenskapelige studier som omhandler dette temaet. I tillegg til grenseverdier blir det viktig å etablere gode metoder for overvåking og måling av sink på stedet (Point of Care (PoC)), for å skaffe kunnskap om nivåene på den enkelte båt og kunne iverksette både kortsiktige avbøtende tiltak (som fortynning, bruk av humusholdig vann) og mer langsiktige korrigerende tiltak. Ekspertene på skipskonstruksjon og korrosjonsbeskyttelse bør vurdere om redusert mengde offeranoder, bedre overflatebehandling eller alternativ korrosjonsbeskyttelse kan ivareta de skipstekniske behovene ved ombygging eller konstruksjon av nye brønnbåter. Ulike typer offeranoder (f.eks. det som kalles miljøanoder) bør også undersøkes med tanke på utlekking av andre metaller som kan være giftige for fisk. Risikovurdering ut fra et fiskehelsemessig hensyn må være helt sentralt i et slik utviklingsarbeid.

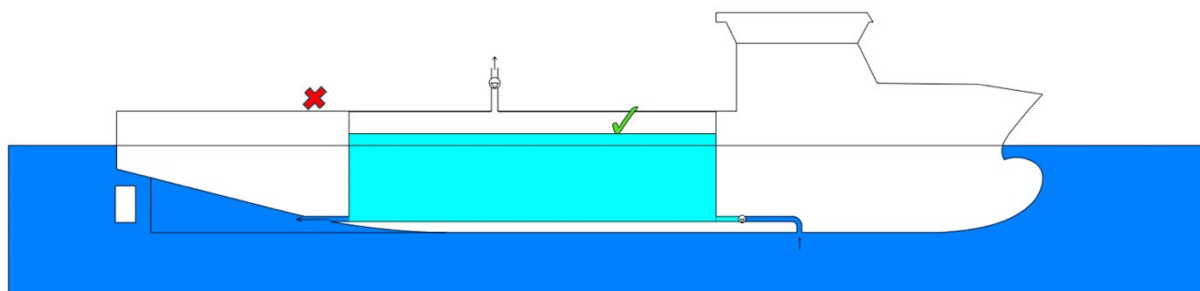
4.1.2. Kartlegge prosesser og prosedyrer som kan føre til overmetning av gasser

Gassovermettet vann kan oppstå i mange typer brønnbåtoperasjoner og påvirke fiskens velferd og helse. Ved lasting og lossing skjer ofte trykkendringer i så stor grad at gassmetningen blir påvirket, og ved trykkreduksjon kan både vann og fisk bli gassovermettet. Temperaturøkning av vann, som ved termisk

avlusing, samt tilførsel av gass under trykk (f.eks. O₂)/innsug av falsk luft vil også øke risikoen for gassovermetning i vannet. Det er i tillegg en del usikkerhet og forvirring knyttet til måling av gasser i vann og begrepene som benyttes når overmetning diskuteres. Dette kan igjen føre til usikkerhet om i hvilken grad vannet er gassovermettet og hvordan dette påvirker fisken. Slike tema er formidlet i de populærvitenskapelige leveransene; Gassovermetning i oppdrettsnæringen, del 1. Hva betyr totalgasstrykk, trykkfall og når er det fare for bobledannelse? (Hess-Erga mfl. 2023a) og; Gassovermetning i oppdrettsnæringen, del 2: Hvor stort trykkfall tåler fisken? (Storsul mfl.2024), samt i Brønnbåtveilederen (<https://brønnbåtveilederen.no/>).

Det benyttes både over- og undertrykk til å flytte eller pumpe fisk. Dette er relevant for brønnbåtsituasjoner, både ved lasting, der trykket i brønnen er lavere enn atmosfærisk trykk, og ved lossing, der trykket i brønnen er høyere enn atmosfærisk trykk. Men tidspunktet der det oppstår risiko for gassovermetning er forskjellig ved lasting og lossing. Ved operasjoner som gir redusert trykk (som ved lasting med undertrykk), vil det være fare for umiddelbar gassovermetning i vannet og fisken. Ved lossing vil økt trykk i systemene øke løseligheten av gasser i vannet (og i fisken), og en større andel av gassen som bobles inn i systemet vil derfor kunne løses i vannet. Når lossingen er avsluttet og trykket reduseres igjen, kan det oppstå fare for gassovermetning i fiskens blod og vevsvæsker. Fisken kan kompensere helt eller delvis for dette ved å svømme dypere ned i vannsøylen.

Måling av totalgasstrykket i vannet og lufttrykket over vannspeilet er grunnlaget for beregning av totalgassmetning, TGP (%). I totalgassmålere beregnes totalgassmetning ved at trykket målt i sensorhodet (enheten som måler totalgasstrykk i vannet) sammenholdes med trykket i avlesingsenheten/instrumentet (som måler lufttrykket/det barometriske trykket). Dette gir riktige resultater så lenge avlesingsenheten/instrumentet befinner seg i luften over det gjeldende vannspeilet. Dersom trykket i luftlommen i brønnbåtens tank reduseres eller økes og ikke lenger er likt barometrisk trykk, vil det ikke lenger være praktisk mulig å ha avlesingsenheten/instrumentet i denne luftlommen. Da må det aktuelle lufttrykket i denne luftlommen legges til grunn for beregning av totalgassmetningen (Figur 2).



Figur 2: I en brønnbåt vil det i en brønn være en luftlomme over vannspeilet. Dersom trykket i denne luftlommen avviker fra lufttrykket/det barometriske trykket, må det aktuelle trykket i luftlommen (markert med grønn hake) legges inn i formelen ved utregning av totalgassmetning i stedet for eksternt barometrisk trykk (markert med rødt kryss). Illustrasjon: Alf Reidar Sandstad/brønnbåtveilederen.no

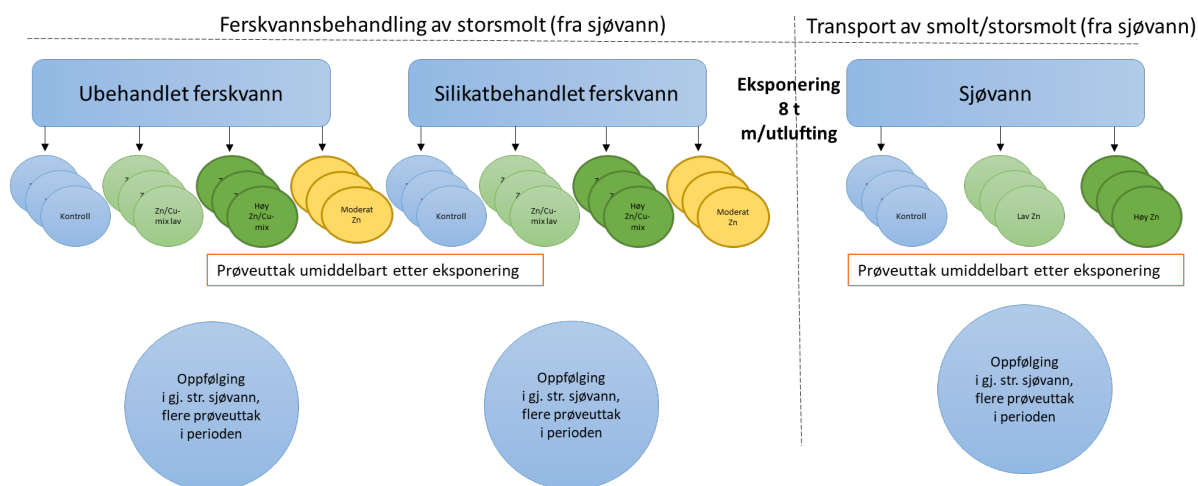
Et annet viktig poeng og en utbredt misforståelse er at overmetning av nitrogengass alene fører til totalgassovermetning og gassboblesyke. I tidlige studier av gassboblesyke fokuserte man på nitrogengassen da den er inert og det ble antatt at overmetning av oksygen ville håndteres da denne gassen inngår i metabolismen. Studier på 1970-tallet stilte imidlertid dette i et annet lys, og i en review-artikkel fra 1980 (Weitkamp & Katz 1980) ble det framhevet viktigheten av totalgassmetningen og ikke nitrogenmetningen alene som danner grunnlaget for gassboblesyke. Dette poenget kan illustreres ved at det er fullt mulig å ha mer enn normal metning av en enkeltgass (f.eks. nitrogen) så lenge summen av

deltrykkene (partialtrykkene) til alle gassene i vannet, ikke gir en totalgassovermetning. Så lenge ΔP er mindre enn eller lik null, (TGP (%) mindre enn eller lik 100) er det ikke mulighet for bobledannelse. I en slik situasjon er det ikke grunnlag for bobledannelse (Colt 2012). Likevel indikerer enkelte studier at et høyere oksygen til nitrogen forhold kan gjøre at fisk tolererer en situasjon med totalgassovermetning noe bedre. Det er sett at tid til alvorlige utslag av gassboblesyke da blir noe lenger, men det er likevel slik at grad av totalgassovermetning og tid fisken utsettes for totalgassovermetningen er langt viktigere for det kliniske utfallet enn balansen mellom enkeltgasser (Pleizier 2020).

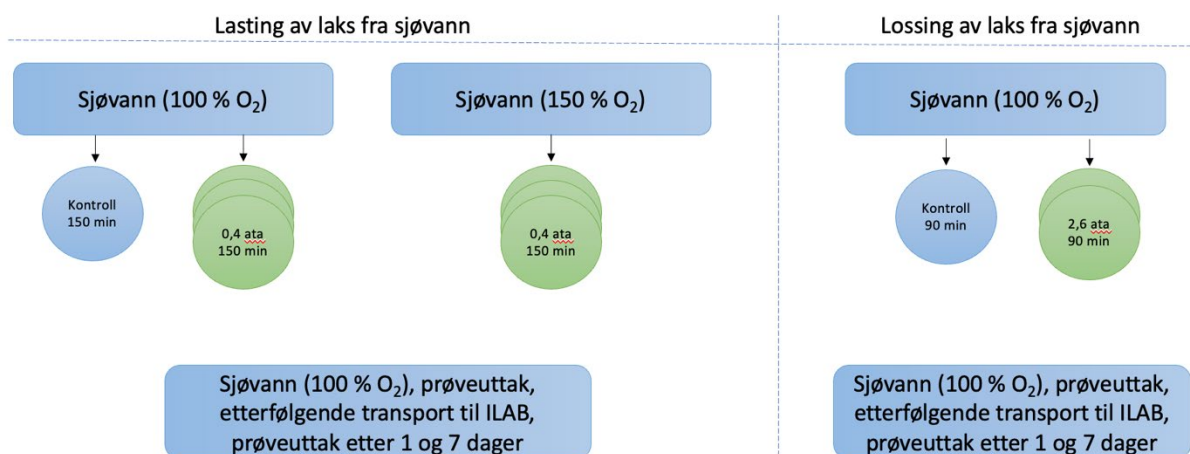
4.1.3. Designe feltundersøkelser og målrettede forsøk

Gjennomgangen av hendelsesrapportene, informasjonen som ble innhentet i BRØK, diskusjoner med referansegruppen, gjennomføring av pilotforsøk og grundig karakterisering av vannet på ILAB, ble benyttet for å justere de målrettede forsøkene og feltundersøkelsene.

Pilotforsøkene på NUI og karakteriseringen av vannet på ILAB bekreftet at forsøksfasilitetene og vannkvaliteten egnet seg til forsøkene. Disse undersøkelsene ble også benyttet til å justere og optimalisere de opprinnelige forsøksoppsettene, slik at hovedforsøkene forløp uten avvik og som vist i Figur 3 og Figur 4.



Figur 3: Forsøksoppsett der effekten av totalkonsentrasjoner av blanding av sink og kobber (Zn/Cu) og sink (Zn) på laks ble undersøkt i kontrollerte forsøk. I de simulerte ferskvannsbehandlingene ble det benyttet følgende totalkonsentrasjoner: kontroll = 0 $\mu\text{g Zn/l}$ og 0 $\mu\text{g Cu/l}$, lav Zn/Cu = 100 $\mu\text{g Zn/l}$ og 2 $\mu\text{g Cu/l}$, moderat Zn = 400 $\mu\text{g Zn/l}$ og 0 $\mu\text{g Cu/l}$, og høy Zn/Cu = 800 $\mu\text{g Zn/l}$ og 6 $\mu\text{g Cu/l}$. I den simulerte transporten ble det benyttet følgende; kontroll = 0 $\mu\text{g Zn/l}$, lav Zn = 100 $\mu\text{g Zn/l}$ og høy Zn = 800 $\mu\text{g Zn/l}$. Ubehandlet ferskvann er ferskvann direkte fra vannkilden til ILAB (Svartediket), behandlet ferskvann er ferskvann fra vannkilden til ILAB (Svartediket) som tilsettes kitoflokk, filtreres gjennom et sandfilter og tilsettes silikatlut.



Figur 4: Forsøksoppsett der effekten av trykk og gassmetning på laks ble undersøkt i kontrollerte forsøk. I de simulerte laste- og losse-operasjonene ble det benyttet trykkforhold i ytterkant (tilsvarende båter med stor løftehøyde) av det som næringen bruker.

Basert på dialog med næringspartnerne, de kontrollerte forsøkene og den øvrige informasjonen ble det identifisert tre brønnbåtoperasjoner av særlig relevans og med tilsvarende utfordringer som testet i de kontrollerte forsøkene. Hver av disse operasjonene ble undersøkt 2 runder, rett etter hverandre, med samtidig prøveuttak for AP2 og AP3 (feltundersøkelser).

Brønnbåtoperasjon 1: Lasting over dewater (vannavskiller) med påfølgende ferskvannsavlusing.

Brønnbåtoperasjon 2: Lasting uten dewater, lengst mulig lukket kjøring av slaktefisk med normal lossing.

Brønnbåtoperasjon 3: Termisk avlusing, i kombinasjon med ferskvannsbehandling.

Prøvetaking og analyser av vann og fisk ble utført i tilsvarende omfang og med stort sett samme metoder (tilpasset felt) som under de kontrollerte forsøkene. I tillegg ble alle relevante sensordata, registreringer og målingene fra brønnbåten innhentet.

4.2 Effekt av vannkvalitet under transport og behandling

Ved flere tilfeller av fiskedødelighet i brønnbåtoperasjoner er det målt høye totalkonsentrasjoner av metallene sink (Zn) og kobber (Cu) i transport- og behandlingsvannet. Konsentrasjonen av disse metallene er lave ved start, men for sink kan totalkonsentrasjonen stige til 800 – 1000 µg/l underveis, spesielt ved lange lukkede transporter og under ferskvannsbehandlinger hvor vannet brukes flere ganger. I slike tilfeller ses også akkumulering av ammonium og CO₂, men sistnevnte fører til lavere pH-verdier som reduserer andelen giftig ammoniakk, i likevektsforholdet mellom ammonium og ammoniakk. Selv om det er kjent at flere av forbindelsene som akkumuleres i vannet kan være toksiske for laks og påvirker ioneregulering, er spesielt effekter av sink på fisken under forhold som er typiske for transport og behandling i brønnbåt lite utforsket. Mange landbaserte oppdrettsanlegg har utfordringer knyttet til giftige aluminiumforbindelser i ferskvannskildene. For å håndtere dette tilsettes vannet silikatlut, som binder Al og gjør den ufarlig for fisken. Tilsetning av silikatlut brukes også av brønnbåtsnæringen for å fjerne giftig Al fra ferskvannet som benyttes, og det er en utbredt oppfatning i næringen at denne silikatbehandlingen også har en avgiftende effekt på de frie tungmetallionene av sink (Zn²⁺) og kobber (Cu²⁺). Denne antagelsen har imidlertid liten eller ingen vitenskapelig støtte, og det trengs mer kunnskap om effektene av denne praksis. Derfor ble det gjennomført kontrollerte laboratorieforsøk for å undersøke effektene av forhøyede totalkonsentrasjoner av Zn og små mengder Cu (for å vurdere evt. interaksjoner) i ferskvann og sjøvann på fiskefysiologi gjennom åtte timer simulert transport og ferskvannsbehandling. I

det følgende presenteres og diskuteres overordnede funn og flere detaljer finnes i den populærvitenskapelige artikkelen (Vogt et al. 2024) og etter hvert i en vitenskapelig artikkel med samme tematikk.

4.2.1. Gjennomføre kontrollerte forsøk der effekten av metaller som laksen kan bli eksponert for i brønnbåt, isoleres

I de kontrollerte forsøkene ble postsmolt (snittvekt 470 g) eksponert for totalkonsentrasjoner av sink og kobber på tilsvarende nivåer som har blitt målt i kommersielle brønnbåtoperasjoner. På forhånd hadde merket fisk (PIT-TAG) blitt identifisert, veiet, flyttet og fordelt i forsøkskarene, under lett sedering (Aqui-S og Finquel Vet). Fisken ble holdt i sjøvann før og etter de simulerte ferskvannsbehandlingene og den simulerte transporten med sjøvann (Figur 3). De to ferskvannsbehandlingene representerte et ubehandlet råvann som inneholdt humus (Figur 5) og et råvann som var behandlet med kitoflokk, rensset med sandfilter og deretter tilsatt silikatlut.

Det er totalkonsentrasjon av sink og kobber i vannet som er rapportert og som ble målt i forsøkene. Totalkonsentrasjonen består både av frie ioner og metallioner kompleksbundet til humus. Det er de frie ionene i løsning som har en giftig effekt på fisken. Vannets hardhet og konsentrasjonen av spesielt kalsiumioner vil påvirke giftigheten. Hvor farlig en gitt totalkonsentrasjon av sink er for fisk er derfor avhengig av vannets kvalitet (innhold av humus og sjøvann, samt pH). I tillegg vil den toksiske effekten av fritt Zn^{2+} påvirkes av helsetilstanden til fisken, det akkumulerende stresset ved håndteringsoperasjoner og det osmotiske stresset som fisken blir utsatt for ved brå endring av salinitet under ferskvannsbehandling.

Sjøvannstransport

I den simulerte sjøvannstransporten klarte fisken seg bra og ingen fisk døde i løpet av de 8 timene med eksponering for ulike totalkonsentrasjoner av sink. Kun én fisk fra høy dosegruppe døde i løpet av oppfølgingsperioden på 20 dager i gjennomstrømmende sjøvann. Fisk som hadde blitt eksponert for høy total dose med sink (800 $\mu\text{g/l}$) i sjøvann hadde imidlertid økte nivåer av plasma-klorid, magnesium, kalsium og en lavere hematokritverdi umiddelbart etter eksponering, sammenlignet med kontrollfisken. Det var også en trend (ikke signifikant) til avtagende gjelle $\text{Na}^+\text{K}^+\text{ATPase}$ aktivitet med økende total sink konsentrasjon. Samlet sett viser dette at høy total sink konsentrasjon påvirker fiskens evne til å opprettholde osmotisk balanse i blodet. En mulig forklaring på den lavere hematokritverdien kan være at volumet til de røde blodcellene har minsket på grunn av utlekking av væske og at ioner strømmer inn i cellen. Dette kan påvirke blodets evne til å ta opp og transportere oksygen. Imidlertid ser det ut til at fisken kommer seg etter eksponeringen, da hematokritnivåene en uke etter eksponering hadde økt til samme nivå som før eksponeringen. Dette indikerer at fisken var i stand til å hente seg inn igjen i et miljø uten ytterligere stressfaktorer. Den lavere giftigheten av sink i sjøvann kan hovedsakelig tilskrives sjøvannets høye hardhet og høye konsentrasjon av Ca^{2+} , som reduserer fiskenes opptak av Zn^{2+} . På grunn av høy pH og de høye konsentrasjonene av klorid og sulfat i sjøvann bindes i tillegg sink opp i forskjellige forbindelser (ZnOHCl , ZnCl^+ , ZnCl_2 , ZnCl_3^- og ZnSO_4), slik at andelen fritt Zn^{2+} i vannet holdes lav (15 %).

Ferskvannsbehandling

I den simulerte ferskvannsbehandlingen med ubehandlet råvann klarte fisken seg bra under selve eksponeringen. Etter tilbakeføringen til sjøvann døde imidlertid én fisk eksponert for moderat dose (400 $\mu\text{g/l}$ totalsink) etter 3 dager, mens etter eksponering for høy dose (800 $\mu\text{g/l}$ totalsink + 6 $\mu\text{g/l}$ totalkobber) begynte fiskene å dø en time etter tilbakeføring til sjøvann, og totalt døde nesten halvparten av fisken. Dette illustrerer at kombinasjonen av sink-eksponering og osmotisk stress kan være dødelig.



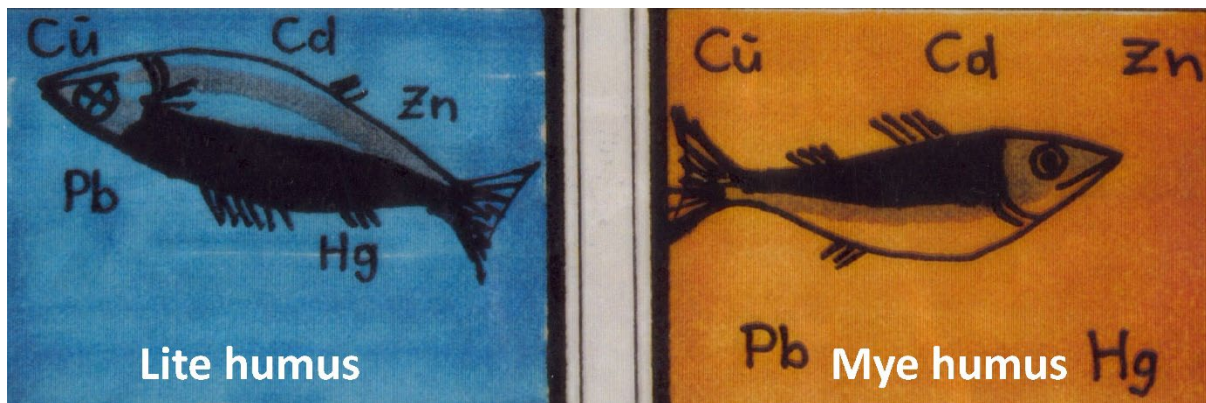
Figur 5: Laks i forsøktank som inneholder råvann med humus (ubehandlet). Foto: Rolf D. Vogt/NIVA.

I rensert ferskvann med tilsatt silikatlut (behandlet vann) var det mindre organisk materiale/humus, (TOC; 3,0 mg/l og fargetall; 15 mg Pt/l) enn i ubehandlet råvann (TOC; 4,7 mg/l og fargetall 33 mg Pt/l). Fisk i gruppene som ble utsatt for moderat konsentrasjon av sink (400 µg/l totalsink) i 8 timer opplevde problemer kort tid etter tilbakeføring til sjøvann, og mer enn halvparten av fisken døde i løpet av den første uken etter behandlingen. Ved høy dose (800 µg/l totalsink + 6 µg/l totalkobber) kunne dødelighet ses allerede etter ca. 6 timers eksponering og ingen fisk overlevde mer enn 1 døgn etter tilbakeføring til sjøvann. Fisk eksponert for moderat og høy konsentrasjon av totalsink i behandlet vann viste en økning i hematokritnivåer, og stresshormonet kortisol i blodet. I ubehandlet råvann ble disse responsene kun observert ved høy dose, og de var da mindre fremtredende. Den plutselige endringen i vannets ionestyrke når fisken overføres fra sjøvann til ferskvann sammen med en høy Zn^{2+} konsentrasjon har forårsaket osmotisk stress og kan ha ført til de økte hematokritnivåene, da de røde blodcellene sveller. Med økende Zn^{2+} dose reduseres gjelle- Na^+K^+ ATPase aktivitet, blodklorid og natrium, dette viser at Zn^{2+} har en direkte negativ effekt på osmoregulering under ferskvannsbehandling. Zn^{2+} eksponering kan også ha ført til direkte skader på gjellevevet og dermed svekket oksygenopptak. For å motvirke oksygenmangelen kan fisken ha rekruttert flere røde blodceller som igjen kan ha ført til forhøyet hematokritnivå. Skadene på gjellene ble bekreftet av histologiske analyser, hvor det rett etter eksponering ble observert degenerasjon og celledød (nekrose) av respiratorisk epitel, kloridceller og lamellenes kapillærstrukturer (pillarceller). Slike skader medfører brudd på en viktig osmotisk barriere, og reduserer dermed fiskens evne til å regulere osmotisk trykk. Høyest forekomst av skader ble registrert i gjeller fra fisk som ble eksponert for behandlet vann og høy dose totalsink. Samme typer skader, men av mindre omfang, ble registrert i gruppen eksponert for behandlet vann og moderat dose totalsink, samt fra ubehandlet vann og høy dose totalsink. Interessant nok var omfanget av skadene i gjellene sammenlignbart mellom de to sistnevnte gruppene, noe som understreker den beskyttende effekten av humusen i det ubehandlede vannet (Figur 5). Samlet sett kan dette tyde på at fisk som døde under forsøket gjorde det som følge av kvelning og/eller osmotisk stress.

Det ble funnet sink på gjellene til fisken, men ikke signifikante forskjeller mellom fisk som ble eksponert for sink og fisk som ikke ble eksponert for sink. Avsetting av stoffer som aluminium og jern på gjeller skyldes at disse ionene hydrolyseres og felles ut som hydroksider (forenklet: $Al(OH)_3$ og $Fe(OH)_3$) ved pH mellom 5,5 og 8,5, som er normalt forekommende i brønnbåter. Sink felles ikke på samme måte siden den først hydrolyserer og danner $Zn(OH)_2$ ved høyere pH verdier (dominerer rundt pH 10).

Fiskene ble observert hyppig underveis i forsøket. Ingen adferdsendringer kunne ses ved overførsel til forsøkskarene. De fleste individer samlet seg nært bunnen etter kort tid, mens noen individer fortsatte å svømme og tidvis gulpe i overflaten. Etter en periode med rolig adferd hvor fisken stod nær bunnen, tok fisken i bruk hele karvolumet. For sjøvannsgruppen ble det ikke observert avvikende adferd underveis i forsøket. I ferskvannsgruppene ble det mot slutten av eksponeringene observert enkeltindivider med avvikende adferd i form av rykkvise utfall, tap av likevekt og sideleie på karbunnen. Slike individer hadde fremdeles gjelleventilasjon og ble tatt ut, avlivet med bedøvelse og prøvetatt.

Akutt dødelighet hos fisk etter 6 timers eksponering i rensset vann som inneholder lite humusstoffer og er tilsatt silikatlut, viser tydelig at silikatlut ikke har en avgiftende effekt på Zn^{2+} . Dette kan skyldes at ved pH mellom 6 og 6,8 er det lite hydrolyse av sink, slik at det binder seg lite til silikatlut.



Figur 6: Illustrasjon av hvordan fisken påvirkes av tungmetaller med hhv. lite og mye humus i vannet.
Kilde: E. Gjessing (pers. kom.)

Rensingen av vannet på ILAB med kitoflokk og filtrering fjerner mest effektivt de store og fargede humusstoffene. Dette fører til stor endring i fargen til vannet og øker giftigheten til sink (Figur 6). I tillegg til humus fra nedbørsfeltet til ferskvannskilden, er vannet også tilført organisk karbon fra fisken, sannsynligvis bestående av slim (for det meste glykoproteiner) og noe avføring. Sistnevnte gir liten fargeøkning og har sannsynligvis også liten effekt på giftigheten til sink, men gir en signifikant effekt på TOC verdiene. Det er derfor en del usikkerhetsfaktorer knyttet til tolkingen av sammenhengen mellom TOC, farge og giftigheten av totalkonsentrasjonen av sink i ferskvann.

Samlet viser resultatene at ved moderate og høye konsentrasjoner av totalsink under ferskvannsbehandling med bløtt vann, kan den samlede belastningen for fisken bli for stor. De observerte fysiologiske responsene er ikke tilstrekkelige til at fisken klarer å håndtere det osmotisk stresset, noe som fører til at fisken dør ved ytterligere påkjenninger og håndtering, som ved tilbakeføring til sjøvann. Det var imidlertid tydelig at fisken klarte seg bedre i ubehandlet ferskvann sammenlignet med behandlet ferskvann med silikatlut. Sannsynligvis er dette på grunn av at det ubehandlede vannet inneholdt mer humus som binder Zn^{2+} og dermed gjør metallet mindre biotilgjengelig og giftig (Figur 5 og Figur 6).

4.2.2. Kartlegge effekten av vannkvalitet og akkumulerte stoffer på fisk under minst to caser av hver av de mest relevante brønnbåtoperasjonene

Se eget underkapittel (4.5) om feltstudiene.

4.3 Gassmetning i vann og effekt på laks under transport og ved behandling i brønnbåt

Gassmetning og hvilke hensyn som må tas ved måling av gasser i vann, er beskrevet under pkt. 4.1.2. For mer informasjon om problematikken se; Gassoovermetning i oppdrettsnæringen, del 1. Hva betyr totalgasstrykk, trykkfall og når er det fare for bobledannelse (Hess-Erga mfl. 2023a), samt Brønnbåtveilederen (<https://bronnbatveilederen.no/>). For å etablere bedre forståelse for gassoovermetning i brønnbåtoperasjoner og effekter på laks ble det gjennomført kontrollerte trykkammerforsøk, hvor lasting og lossing av fisk ble simulert (Figur 4). I det følgende presenteres og diskuteres overordnede funn fra disse forsøkene. For flere detaljer, se de to populærvitenskapelige artiklene (Hess-Erga mfl. 2023b og Storsul mfl. 2024) og etter hvert den vitenskapelige artikkelen om tematikken.

4.3.1. Kartlegge kunnskapsgrunnlag om trykkfallssyke hos laks

Vi vet lite om konsekvensene av trykkesponeringer i brønnbåtoperasjoner og gassboblesyke. Fisken kan utsettes for endret trykk i fra flere minutter til flere timer. Selv om mekanismene som har forårsaket gassoovermetningen varierer, vil effektene på fisken være relativt sammenlignbare. Effekten på fisken vil først og fremst avhenge av graden av totalgassoovermetning og tiden fisken eksponeres for overmetningen. Skader forårsaket av gassbobler kan deles opp i 1) brått innsettende skader (akutte forandringer) og 2) senskader (kroniske forandringer). Akutte skader er ofte et resultat av at større bobler fester seg i store blodkar og medfører svikt i blodtilførselen. Særlig er dette kritisk ved betydelige mengder gassbobler i hjertet, noe som kan medføre akutt hjertesvikt og død (Beyer mfl. 1976). Det er også vist at bobledannelser i gjeller er nært korrelert med økt dødelighet (Pleizier mfl. 2020). Dersom bobler fester seg i mindre karforgreninger i perifert vev, vil dette kunne medføre svikt i næringstilførselen til vevet som ligger nedstrøms, og gi skader eller celledød. Da det gjerne tar lengre tid å utvikle slike vevsskader, vil de kunne oppfattes som senskader. Eksempler på slike skader kan være sårskader i hud og finner, vevsdød i gjeller, og akkumulering av gass i fettvev bak øyet som klinisk gir seg utslag i utstående øyne (exophthalmus) (Speare 2010). Det kan ofte gå flere uker før slike senskader kommer til syne, og det vil derfor kunne være vanskelig å relatere de til tidligere episode med gassboblesyke. En ytterligere kompliserende faktor er at diagnostikk av gassboblesyke generelt kan være utfordrende.

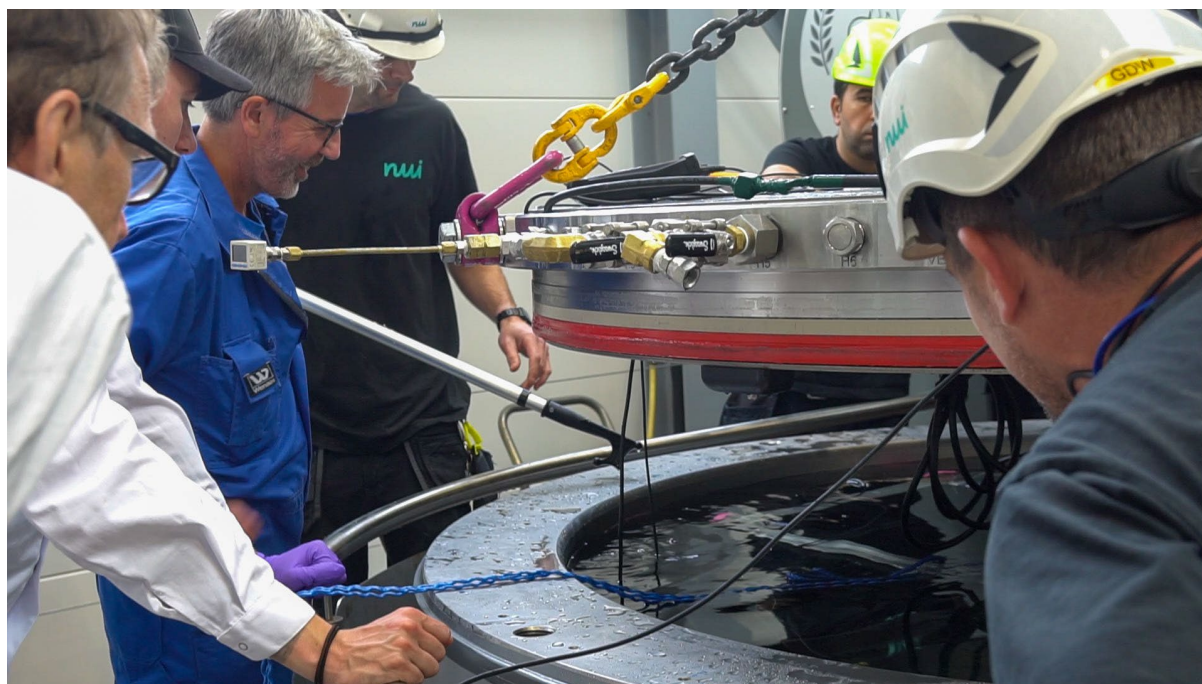
Blodtrykket vil til en viss grad forebygge utviklingen av gassboblesyke, da blodtrykket er høyere enn trykket i omgivende vann. Det arterielle blodtrykket er igjen høyere enn blodtrykket i venøs sirkulasjon. Det er derfor nærliggende å anta at ved gassboblesyke forårsaket av trykkreduksjon, der fisken er i vannet når trykket reduseres, vil gassbobler i blodbanen først oppstå på venøs side hvor trykket er lavest. I et slikt tilfelle vil både vannet og fiskens blod og vevsvæsker bli overmettet på samme tid. Dette står i motsetning til situasjonen hvor f.eks. falsk luft i vanninntaket til et settefiskanlegg fører til totalgassoovermetning og gassboblesyke. I et slikt tilfelle er det vannet som er overmettet i utgangspunktet, og fiskens blod og vevsvæsker blir gradvis overmettet ved at gassen i stor grad tas opp over gjellenes lameller før det transporteres ut til vev fra arteriell side. Selv om slike forhold ikke har blitt systematisk undersøkt, er det grunn til å tro at ulike mekanismer som grunnlag for totalgassoovermetning vil kunne gi forskjeller i distribusjon av gassbobler innledningsvis i utviklingen av gassboblesyke. Videre vil stoffskiftet gjennom forbruk av oksygen redusere deltrykket av oksygen og dermed faren for å utvikle gassbobler i systemisk sirkulasjon (Pleizier mfl. 2020). Forbruket av oksygen betyr at for en gitt totalgassoovermetning, vil en høy andel av oksygen være mindre skadelig enn en høy andel nitrogen (en gass som ikke inngår i cellemetabolismen). Begge faktorer, det indre blodtrykket og forbruk av oksygen i cellemetabolisme, er med på å forklare hvorfor fisk kan leve med lave nivåer av gassoovermetning uten å utvikle sykdom. Det er likevel viktig å understreke at det bør tilstrebes å unngå totalgassmetning på over 100 %.

Det er også faktorer i miljøet som kan påvirke bobledannelse og utviklingen av gassboblesyke. Nedover i vannsøylen vil det hydrostatiske trykket (trykket fra vannet) øke i takt med den økte vekten av vannsøylen over. Dette økte trykket vil medføre at vannet kan løse mer gass. Dersom totaltrykket (hydrostatisk trykk + lufttrykket over vannspeilet) overstiger TGP (det totale gasstrykket av alle gasser i vann) vil det ikke lenger være grunnlag for bobledannelse og heller ikke gassboblesyke. Dette betyr også at risikoen for å utvikle gassboblesyke er høyest i overflaten og avtar gradvis nedover til kompensasjonsdypet, som er dypet der den aktuelle totalgassmetningen ikke fører til bobledannelse pga. det hydrostatiske trykket.

For flere detaljer om temaet, se den populærvitenskapelige leveranse; Gassovermetning i oppdrettsnæringen, del 2: Hvor stort trykkfall tåler fisken? (Storsul mfl.2024).

4.3.2. Undersøke hvordan ulike trykkforhold og varighet av trykkendringer påvirker laks i/etter kontrollerte forsøk

De kontrollerte forsøkene (Figur 4) simulerte trykkforhold og varighet (tid fra første til siste fisk er lastet/losset) i ytterkant av det som benyttes i brønnbåter, hvor fisk og vann suges om bord (lasting) og føres ut igjen ved hjelp av økt trykk (lossing). I forsøkene ble en trykktank (volum = 8,9 m³, diameter=1,8 m) ved NUI fylt med sjøvann (Figur 7). 12 laks om gangen ble ført inn i en sylindrisk not slik at fiskene var i den øverste meteren av vannsøylen, men ikke i kontakt med luftlommen øverst i tanken (Figur 8). Vannet og fisken ble enten dekomprimert (fra høyere til lavere omgivelsestrykk - lasting) eller komprimert (fra lavere til høyere omgivelsestrykk - lossing) i løpet av få sekunder og holdt ved det aktuelle omgivelsestrykket i maksimalt 150 minutter. Den simulerte lasteprosessen innebar dekomprimering av fisk fra normalt overflatetrykk (1 ata) til et lavere trykk; 0,4 ata (tilsvarer 6 meters «løftehøyde» eller atmosfæretrykket ved ca. 7000 meters høyde over havet) og den simulerte losseprosessen innebar komprimering fra normalt overflatetrykk (1 ata) til et høyere trykk; 2,6 ata (tilsvarer 16 meters vanddybde) i trykkammer. Etter å ha holdt omgivelsestrykket på 0,4 ata eller 2,6 ata i varierende tid og der fisken ble observert i henhold til avbruddskriterier, ble fiskene tilbakeført til normalt omgivelsestrykk. Deretter ble fisken undersøkt med forskjellige metoder for å kartlegge effekter av eksponeringen.



Figur 7: Fisken ble testet i trykktank som kunne utsette den for både over- og undertrykk. Foto: Jonas Giæver/NIVA.



Figur 8: Fisk i trykktanken på NUI. Foto: Jonas Giæver/NIVA

I forsøkene hvor det ble simulert lastning med dekomprimering til 0,4 ata, ble det som forventet observert at fiskene slapp ut gass fra svømmeblæren umiddelbart etter at trykket ble redusert. Etter om lag en time ved 0,4 ata ble det i alle forsøkene observert enkelte individer med raske svømmebevegelser, noen ganger også med rykkvise bevegelser og mulige kramper. Senere i forløpet så man svømmende fisk som fikk problemer med likevekten og fisk som ble liggende i sideleie på bunnen.

Ved komprimering til 2,6 ata ble det ikke observert vesentlige avvik fra normaladferd.

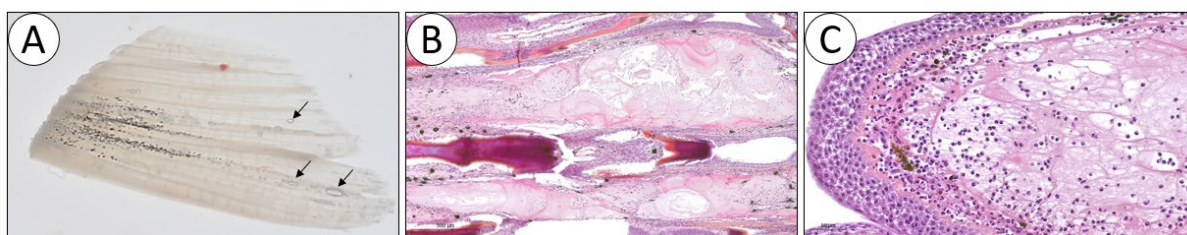
Posisjoneringen av de individene som var i likevekt var også ulik mellom de ulike eksponeringene. Ved redusert trykk til 0,4 ata prefererte de fleste individene å være i nedre fjerdedel av den tilgjengelige vannsøyla, i kontrollene var om lag halvparten av individene i den nedre fjerdedel av vannsøyla på observasjonstidspunktene, mens ved økt trykk til 2,6 ata var godt under halvparten av individene posisjonert i nedre fjerdedel av vannsøylen på de samme tidspunktene. Det er tidligere sett at laksefisk ikke unngår totalgassovermettet vann (Pleizier mfl. 2021), men det er observert liknende funn med hensyn til vertikal posisjonering hos laksefisk ved totalgassovermettet vann (bl.a. Dawley mfl. 1976).

Ultralydundersøkelser (Figur 9) og visuelle observasjoner etter eksponering, påviste bobler i blodomløpet og finner hos enkelte fisk. Andelen fisk med avvikende adferd og bobler i blodomløpet og i finnene, økte med eksponeringstiden (60 til 113 minutter). Omfattende bobledannelse var alltid assosiert med fiskedød. Dette viser at trykkfallssyke kan påføres laks ved et slikt omgivelsestrykk og varighet i simulerte lasteoperasjoner, forhold som er relevante for næringen. Laks tåler tilsynelatende lossing (komprimering) under testede trykkforhold bedre.

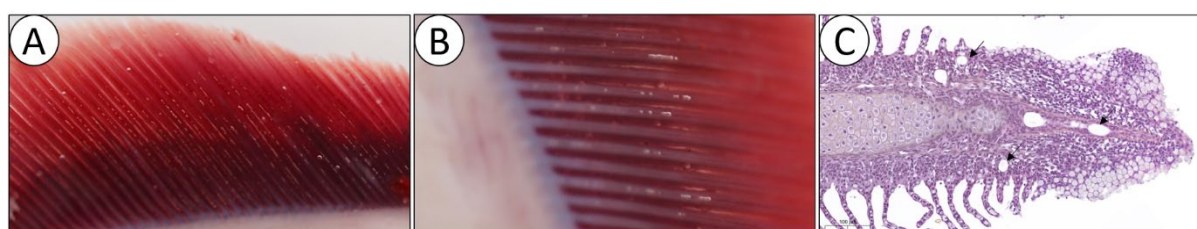


Figur 9: Det ble brukt ultralyd for å se etter gassbobler i blod og vev. Foto: Jonas Giæver/NIVA.

Resultatene viser at lastetid utover en time ved trykkforhold rundt 0,4 ata medfører fiskedød. Endret adferd og gassbobler i gattfinne kan oppdages med videokamera i tanken og er en mulig indikator på trykkfallssyke. Forsøkene viser også at dødelighet forårsaket av trykkfallindusert gassbablesyke er vanskelig å avdekke i ettetid. Visuell inspeksjon av særlig finner (Figur 10) og til dels gjeller (Figur 11) kan gi nyttige indikasjoner og ultralyd viste seg å være meget effektivt for å påvise gassbobler i systemisk sirkulasjon. Ultralyd er gullstandarden for diagnostikk av gassbobler ved dykkersyke hos mennesker, og det samme ser ut til å gjelde for trykkfallindusert gassbablesyke hos fisk. Angiotensinkonverterende enzym, hematokrit, hemoglobin og skåret exophthalmus ga lite eller ingen diagnostisk verdi. Det var også dårlig sammenheng mellom kliniske utslag og funn på histologiske undersøkelser.



Figur 10: Bobledannelser i finner. A) Makroskopisk synlige bobledannelser i gattfinne hos fisk med trykkfallssyke; piler peker mot eksempler på gassbobler. B) Histologi av gassbobleskader i finne fra fisk som døde av trykkfallssyke. Merk overveiende fibrinøs betennelsesrespons i bløtvev mellom finnestrålene. C) Histologi fra gassbobleskader i gattfinne hos fisk syv dager etter at fisk ble påført trykkfallssyke. Merk betydelig forekomst av fibrin sammen med polymorfnukleære betennelsesceller (trolig nøytrofile granulocytter).



Figur 11: Bobledannelser i gjeller. A og B) Makroskopisk synlige bobledannelser i filament-arterier. C) Histologi av gjelle fra A/B som viser hulrom (eksempler indikert med piler) i ytre (distale) del av filament, både i tilførende filament-arterie men også med overgang til lamellære arterioler og – kapillærer. Disse hulrommene antas å representere gassbobler.

4.3.3. Undersøke hvordan ulike trykkforhold og varighet av trykkendringer påvirker laks i/etter praktiske brønnbåtoperasjoner

Se eget underkapittel (4.5) om feltstudiene.

4.4 Mulige tiltak, operasjonelle prosedyrer og betraktninger for eksisterende og nye brønnbåter

4.4.1. Tiltak og operasjonelle prosedyrer som reduserer biologisk risiko ved transport og behandling av laks i brønnbåt

Operasjonelle tiltak som kan redusere risikoen for totalgassovermetning forårsaket av trykkreduksjon kan deles inn i tiltak for å redusere totalgassovermetningen og tiltak for å redusere eksponeringstiden. For førstnevnte dreier det seg ved lasting om å redusere løftehøyden dersom det finnes tekniske eller praktiske løsninger for dette, da økningen i gassmetning vil være direkte forbundet med løftehøyden. Under transport vil det være gunstig å ikke redusere trykket i brønnen under atmosfærisk trykk så fremt det er mulig. Ved lossing vil det, selv om prosjektet ikke gjorde forsøk med et slikt scenario, ut fra en teoretisk tilnærming være gunstig å ikke overoksygenere. Ettersom konsekvensene for fisken i størst grad er knyttet til grad av totalgassovermetning og tid, så er tidsfaktoren også viktig. Det vil si at man bør tilstrebe å ikke ha lang lastetid kombinert med lavt trykk, og ikke ha unødig lang varighet på lossing med høyt trykk og samtidig oksygenering.

Som beskrevet under pkt. 4.1.1 er kildene til forhøyede sinkkonsentrasjoner i brønnvann med stor sannsynlighet sinkanoder og annen korrosjonsbeskyttelse i form av sink-holdig maling og galvanisert stål. Flere næringspartnere har på eget initiativ undersøkt om færre sinkanoder reduserer sinkkonsentrasjonen

i vannet. Resultatene varierer og kan enten indikere at sink-holdig maling og galvanisert stål bidrar mer enn antatt eller at de ulike sinkanodene frigir ulike mengder sink til vannet, sannsynligvis avhengig av elektrokjemien rundt disse anodene.

Det finnes flere alternativer til offeranoder av sink, men det kan se ut som slike systemer/løsninger i liten grad har blitt vurdert og heller ikke risikovurdert ut fra fiskehelsemessige hensyn. Noe av grunnen til dette kan være den generelle mangel på vitenskapelige studier som omhandler dette temaet. I tillegg til grenseverdier blir det viktig å etablere gode metoder for overvåking og måling av sink på stedet (Point of Care (PoC)), for å skaffe kunnskap om nivåene på den enkelte båt og kunne iverksette både kortsiktige avbøtende tiltak (som fortykning, bruk av humusholdig vann) og mer langsiktige korrigerende tiltak. Eksperter på skipskonstruksjon og korrosjonsbeskyttelse bør vurdere om redusert mengde offeranoder, bedre overflatebehandling eller alternativ korrosjonsbeskyttelse kan ivareta de skipstekniske behovene ved ombygging eller konstruksjon av nye brønnbåter. Ulike typer offeranoder (f.eks. det som kalles miljøanoder) bør også undersøkes med tanke på utlekking av andre metaller som kan være giftige for fisk. Risikovurdering ut fra et fiskehelsemessig hensyn må være helt sentralt i et slik utviklingsarbeid.

Mer informasjon om tiltak og operasjonelle prosedyrer finnes i Brønnbåtveilederen (<https://brønnbatveilederen.no/>).

4.4.2. Tekniske løsninger for eksisterende brønnbåter og designimplikasjoner for nye brønnbåter

For å flytte fisk fra merd til brønnbåt benyttes ulike pumpesystemer om bord, tilkoblet fleksible slanger som er senket ned i merdvolumet. I merden er fisken mekanisk trengt sammen til en høyere tetthet på forhånd, for å sikre at den enklere kan suges inn i slangen. Typisk leveres fra noen hundre tonn til opp mot 1000 tonn fisk per time ved slike operasjoner, alt etter hvor mange slanger som benyttes og hvor store disse er. For de største båtene har slangene i dag gjerne en diameter på ca. 20 tommer, mot 12 tommer for ikke så alt for mange år siden. Også båtene har økt betydelig i størrelse, dette medfører at på tross av økte slangediametere og antall slanger er lastetiden så å si uendret. For de fleste nye store fartøyer har vannstanden inne i fartøyets tank sammenlignet med havnivået på utsiden økt. Dette medfører at fisken og vannet den pumpes sammen med, må løftes høyere enn tidligere.

Videre er de fleste brønnbåter i dag designet med vannavskillere (ofte kalt silkasser eller dewater-systemer) som blant annet benyttes ved lasting av fisk til ferskvannsavlusning. I vannavskillerne skilles fisken og vannet, slik at vannet fra merden ikke blir med inn i fartøyets brønner/tanker. Vannet pumpes ut og fisken sklires eller faller ned i brønnbåtens brønn/tank. Denne løsningen medfører at den nødvendige løftehøyden fisken må heves før den forlater pumpesystemet og faller ned i vannavskilleren økes betraktelig. Den nødvendige løftehøyden kan være opp til ca. 6 meter over havnivået.

Pumpesystemer

Felles for så å si alle pumpesystemer for fisk er at det er vannet som pumpes og at fisken blir med vannet. Det eksisterer et utall ulike teknologier for slik pumping, men løsningene kan deles inn i to hovedkategorier hvor den ene benytter et redusert trykk som slik suger fisk og vann mens den andre kategorien skyver fisken og vannet ved hjelp av et økt trykk. Ved lasting av en brønnbåt benyttes som oftest et sugesystem hvor trykket i brønnen først reduseres ved å suge ut luften i den tette tanken inntil vannet fra pumpeslangene leverer ønsket mengde vann. Når dette er oppnådd igangsettes vannpumper i bunnen av tanken til å pumpe ut tilsvarende mengder vann som strømmer inn i tanken. Slik kontrolleres vannivået i tanken. Skyvende løsninger som trykker fisk og vann er eksempelvis ejektorløsninger eller sentrifugalpumper. Utfordringen for disse pumpene er at fisken er med gjennom pumpen, noe som kan være en betydelig mekanisk belastning, særlig ved store løftehøyder. Ved lossing av brønnbåt benyttes

også en trykkløsning, men denne skiller seg ut ved at fisken ikke er med gjennom pumpen. Her settes i stedet hele rommet under trykk og slik skyves fisken ut av tanken og videre i tilkoblede rør dit den skal leveres. Trykket som settes på tanken ved trykklossing er som oftest oppnådd ved å pumpe vann inn i tanken. For å sørge for at all fisk «fanges» i utløpsrøret benyttes perforerte skyveskott som trenger fisken inn mot utløpet. I NYBRØK-prosjektet er det dokumentert at redusert trykk (lavere trykk enn atmosfærisk trykk) til 0,4 ata og holdetider over ca. 1 time er skadelig for fisken. Ved å finne alternative løsninger til bruk av sug for flytting av fisk kan faren for skade elimineres uavhengig av eksponeringstiden. Ved å redusere tiden vil skadepotensialet reduseres betraktelig, men det kreves mer arbeid for å kartlegge eksponeringstiden fisken trygt kan utsettes for ved ulike undertrykk. I det følgende vil det gis noen eksempler på hvordan utfordringene knyttet til sugende systemer og eksponering kan forbedres på eksisterende og nye brønnbåter.

Tekniske løsninger som kan redusere faren for skade på fisk ved lasting til eksisterende brønnbåtflåte

Den sikreste løsningen for å redusere problemer knyttet til reduserte trykk er å redusere eller eliminere bruken av sugende pumpeløsninger. Dette kan oppnås ved å trykke vann og fisk inn i båten. Som beskrevet innledningsvis er det fare for mekanisk skade på fisken ved bruk av slike skyvende løsninger, særlig ved store løftehøyder. Det kan derfor være et godt alternativ å kombinere det eksisterende sugesystemer med trykkpumpeteknologier. Slik kan ønsket pumpeeffekt oppnås uten at trykket i tank er kritisk lavt samtidig som løftehøyden på trykkpumpen også beholdes innenfor verdier uten fare for mekanisk skade på fisken. Eksempelvis kan dette oppnås ved å benytte ejektorpumpe(r) nært havoverflaten. Disse kan flenses inn på leveringslangen nært sugetrakten hvor fisken suges inn i slangen. Slik vil ejektoren bidra til å presse fisk og vann inn i båten og slik tillate at trykket i tanken kan heves tilsvarende trykket ejektoren bidrar med. Basert på lang erfaring i oppdrettsnæringen ved bruk av ejektorpumper anbefales det at løftehøyden begrenses til maksimalt ca. 2-3 meter. For brønnbåter med nødvendig løftehøyde på 6 meter kan dermed én ejektor redusere nødvendig trykkendring i brønn/tank opp mot en halvering av løftehøyden. Ved behov kan ejektorer også monteres i serie med 2 eller flere enheter, enten for å øke løftehøyden eller for å redusere faren for mekanisk skade. Undertrykket i tank kan derfor reduseres eller om ønskelig elimineres ved bruk av allerede eksisterende teknologi.

Et annet forbedringspunkt kan være å redusere tiden fisken utsettes for reduserte trykk, dette kan blant annet oppnås ved å øke pumpekapasiteten. Dessverre er plassmangel ofte utfordrende på brønnbåter og det er usannsynlig at det vil være plass til slik kapasitetsøkning. Et siste alternativ som derimot bør kunne avhjelpe situasjonen på flere fartøyer er å redusere nødvendig løftehøyde inn på tank til et absolutt minimum. Dette kan oppnås ved å forlenge innløpsrør til det er neddykket i tankens vannvolum. Før båtene ble tilpasset ferskvannsavlusing var dette bransjestandarden da det gir skånsom lasting samtidig som energiforbruket minimaliseres. Dette som følge av at hevertprinsippet som oppstår reduserer det nødvendige suget til utelukkende å dekke rørfriksjon fra merd og inn til tank + høydeforskjellen mellom vannstand i tank og havnivået. Denne høydeforskjellen kan reduseres ytterligere ved å redusere vannstanden i brønnen. For enkelte fartøyer kan det også være mulig å redusere vannstanden til under havnivå. I slike tilfeller kan heverteffekten bidra til nødvendig sug på løftesiden slik at trykket i tanken kan være atmosfærisk. Fisken vil ved slik lasting utelukkende oppleve reduserte trykk i den korte perioden hvor den befinner seg i slange og rør som befinner seg over havnivå, noe som dreier seg om sekunder og derfor vil være uproblematisk selv om rørføringene er hele 6 meter over havnivå (trykk på 0,4 ata). Hvorvidt det også kan være mulig å føre rørene noe høyere er uklart. Det som imidlertid er helt sikkert er at løftehøyder ved hjelp av sug teoretisk aldri kan være større enn det omgivende gasstrykket som ved havnivå tilsvarer ca. 10 meter vannsøyle. I praksis blir imidlertid dette svært utfordrende og det er sjelden slike systemer løfter mer enn ca. 6 meter.

Nybygg

Ved design av nye brønnbåter bør det legges vekt på å unngå trykk lavere enn anbefalte grenseverdier. Disse er pt. ikke definert, men ved å vektlegge lave trykkdifferanser i designet er det sannsynlig at nye fartøyer kan lastes uten bruk av modifisert trykk eller med svært lavgradig trykkreduksjon i brønnen/tanken. Dette kan løses på mange måter og valg av løsning vil være en avveining mellom kost, nytteverdi og risiko gjennom fartøyets levetid. Dette er komplekse vurderinger og det vil ta år med prøving og feiling før en eller flere løsninger utkrystalliserer seg som de(n) beste løsningen(e). I arbeidet med å finne disse løsningene foreslås å vurdere følgende for hver av utfordringene:

Redusert trykk:

- Løsninger som bidrar til få eller ingen designendringer i forhold til dagens brønnbåter, men som reduserer/fjerner behovet for trykk mindre enn atmosfærisk trykk i brønnen. Disse løsningene vil være de samme som ble foreslått for eksisterende båter
- Senke høyde på brønnene/tankene slik at vannet i mindre eller ingen grad må løftes om bord. For å redusere belastning på fisken /unngå gassboblesyke som følge av trykkendringer bør det også vurderes om slanger og rør i størst mulig grad kan føres uten store høydevariasjoner fra merd til brønn
- Utvikling av nye vannavskillere som med fordel kan monteres lavt i båten og dermed ikke bidrar til økt løftehøyde
- Nye rør og brønn-/tankarrangementer som reduserer nødvendig løftehøyde basert på sug

Tid:

- Øke kapasitet på lastesystemet for å redusere nødvendig eksponeringstid for lavt trykk under lasting
- Redusere størrelsen på tankene
- Nye prosedyrer og arrangementer som eksempelvis kan muliggjøre sekvensiell lasting til transfer-tank hvor fisken flyttes ut av rom med trykk lavere enn atmosfærisk trykk og over i tanker med normalt trykk (atmosfærisk trykk) ved kortere tidsintervaller

Overmetning:

- Dypere tanker vil gi fisken bedre mulighet til å svømme ned på dypet og slik redusere problemet knyttet til gassovermetning
- Redusert totalgassmetning i tank-vannet vil gi fisken bedre mulighet til å redusere TGP i vevet ved å transportere ut større mengder gass via gjellene til vannet i tanken
- Øke trykket i tanken umiddelbart etter lasting for å redusere eventuelle skader som har oppstått på fisken
- Prosedyrer for å unngå overmettet vann i merd før lasting igangsettes. Ettersom fisken vil ha tilnærmet samme gassmetning som omkringliggende vann er det fordelaktig om vannet og fisken har $TGP < 100 \%$ for å gi større robusthet mot overmetning ved lasting med lavt trykk

4.5 Feltstudier av tre forskjellige brønnbåtoperasjoner

I tillegg til de kontrollerte forsøkene i prosjektet, ble det utført feltstudier av ulike typer brønnbåtoperasjoner som dekket både undersøkelser for akkumulerte stoffer og undersøkelser av trykk, totalgassmetning og gassboblesyke (Stensby-Skjærvik mfl. 2024). Feltstudiene hadde som hovedmål å sammenlikne funnene under kommersielle forhold med resultatene fra kontrollerte forsøk gjennomført i AP2 og AP3. Det var også ønskelig å vurdere egnetheten i felt for de diagnostiske metodene etablert i kontrollerte forsøk. Feltstudiet var innrettet for å dekke minst to runder/laster av hver av de mest relevante brønnbåtoperasjonene som ble identifisert for prosjektets problemstillinger: lasting via dewater (vannavskilling), lasting uten dewater, lossing, ferskvannsavlusing og termisk avlusing. Det ble

på forhånd definert at minst to ulike brønnbåtdesign skulle være representert. På grunnlag av dette ble det gjennomført feltstudier på tre ulike båter og operasjoner, hvor det ble fulgt to runder/laster for hver båt og operasjon:

- Brønnbåtoperasjon 1: Ferskvannsbehandling (lasting via dewater, avlusing i ferskvann, lossing via dewater)
- Brønnbåtoperasjon 2: Ferskvannsbehandling med påfølgende termisk avlusing (lasting via dewater, avlusing i ferskvann, lossing via dewater og termisk avlusingsenhet)
- Brønnbåtoperasjon 3: Slaktetransport (lasting uten dewater, delvis lukket transport, delvis semilukket transport, lossing uten dewater)

4.5.1. Vannkvalitet og akkumulerte stoffer

Vannkvalitet og akkumulerte stoffer under brønnbåtoperasjonene er vurdert gjennom vannprøver og gjennomgang av data fra sensorer om bord i båtene. Fra alle tre brønnbåtoperasjoner ble to etterfølgende runder (behandlinger eller laster) undersøkt og fra hver runde ble replikate prøver tatt ut fra merd, brønnvann før lasting, halvveis og ved lossing av operasjonen. Vannprøvene ble analysert ved Eurofins laboratorium etter akkrediterte metoder.

Generelt for vannkvalitetsparameterne med betydning for fiskevelferd i brønnbåtoperasjoner er det manglende dokumentasjon på fysiologiske effekter av store svingninger, korttidseksponeringer og hvordan stress i forkant av operasjon (trenging og lasting) påvirker toleranse til enkelte parameterer og kombinasjonseffekter. Derfor diskuteres enkeltparametere i denne sammenheng oppimot grenseverdier eller anbefalinger som finnes i vitenskapelig litteratur, og er sammenholdt med NIVAs database for råvann benyttet til akvakulturformål (VK-databasen, som dekker over 80 % av alle vannkilder som benyttes p.t., se for eksempel Kristensen mfl. 2009). Målte totalkonsentrasjoner av sink og kobber diskuteres i lys av resultatene fra de kontrollerte forsøkene.

Mange fysiologiske funksjoner hos fisken påvirkes av pH i blodet, som igjen påvirkes av pH i vann, derfor er en jevn og stabil pH ønskelig. pH kontrollerer også en rekke løselighets- og likevektsreaksjoner, som forholdet mellom ammonium (NH_4^+) og ammoniakk (NH_3). pH virker også inn på giftigheten av hydrogensulfid og totalkonsentrasjoner av løste metaller (aluminium, jern, kobber, kadmium og sink). For laksefisk er det anbefalt at vannet har en pH mellom 6,2 og 7,8. Ved alle tre brønnbåtoperasjoner var pH innenfor dette intervallet, men sank underveis i behandling/runde pga. økende nivåer av CO_2 . Ved overgangen fra ferskvannsbehandling til termisk avlusning med sjøvann ble det en brå pH-økning fra 6,8 til 7,8.

Under ferskvannsavlusing med RO-vann ble den høyeste totalt ammonium nitrogen (TAN) og den beregnede ammoniakkkonsentrasjonen ($\text{NH}_3\text{-N}$ - 53 $\mu\text{g/l}$) registrert i brønn før lasting av fisk. Etter hvert i behandlingen sank pH og dermed også ammoniakkkonsentrasjonen. Ved ferskvannsavlusing etterfulgt av termisk behandling, steg $\text{NH}_3\text{-N}$ raskt etter lossing fra ferskvann til oppstart av termisk behandling i sjøvann og de høyeste nivåene (76 $\mu\text{g/l}$) ble registrert halvveis gjennom termisk behandling. $\text{NH}_3\text{-N}$ økte under transporten, men var lav (maks 1,8 $\mu\text{g/l}$). Ved ferskvannsavlusing og termisk behandling økte $\text{NH}_3\text{-N}$ relativt kjapt og overskred anbefalt grenseverdi for langtidseksponering på 12 $\mu\text{g/L}$ (Fivelstad mfl. 1995) men var fortsatt under den anbefalte grenseverdien for kortvarig eksponering (4 timer) til NH_3 på 100 $\mu\text{g/L}$ (Wedemeyer mfl. 1995).

Ved ferskvannsbehandling (med RO-vann) ble det målt relativt høye totalkonsentrasjoner av sink i brønn før lasting (gjennomsnittlig 540 $\mu\text{g/l}$ last 1 og 595 ved last 2). Det var også en økning under den ca. 10 timer lange ferskvannsbehandlingen, og ved lossing last 2 var den gjennomsnittlige totale

sinkkonsentrasjonen i brønnen 690 µg/l. Den totale sinkkonsentrasjonen under begge behandlingene var mellom moderat (400 µg/l) og høy dose (800 µg/l) i de kontrollerte forsøkene der ferskvannsbehandling ble simulert. Det ble imidlertid ikke observert vevsskader i gjellene hos disse fiskene tilsvarende det som ble observert under kontrollerte forsøk. I behandlet ferskvann (se pkt. 4.2.1) førte både en moderat og høy total sinkdose til skadet gjellevev, osmoregulatorisk svikt og dødelighet etter 8 timers simulert behandling. At sink ikke har påvirket fisken i like stor grad under ferskvannsbehandlingen med RO-vann kan skyldes at hardhet og særlig kalsiumkonsentrasjonen var 5 ganger høyere enn i de kontrollerte forsøkene. Zn^{2+} og Ca^{2+} konkurrerer om samme opptaksvei via gjellene og derfor vil en økt Ca^{2+} i vannet beskytte mot sink-toksisitet (Hogstrand mfl. 1996).

4.5.2. Trykkendringer, totalgassmetning og gassboblesyke

Ved lasting via dewater og ferskvannsavlusing, brønnbåtoperasjon 1, ble det målt nivåer av totalgassovermetning som potensielt kunne føre til gassboblesyke hos laksen i brønnen. Etter lasteoperasjon ble det makroskopisk observert gassbobler i hjertet og lever hos flere individer ved obduksjon, men ikke ved ultralydundersøkelse. For å undersøke ultralydmetodikken nærmere ble det gjort undersøkelser med ultralyd på ulike tidspunkter i prøvetakingskjeden. Enkelte individer uten påviste gassbobler ved første ultralyd etter sedasjon, viste forekomst av betydelige mengder gassbobler etter blodprøve- og/eller gjelleuttak både ved ultralyd og makroskopisk ved obduksjon. Det ble ikke observert bobler i finner.

Ved oppfølging av ferskvannsavlusing etterfulgt av termisk avlusing, brønnbåtoperasjon 2, og ved oppfølging av slaktetransport, brønnbåtoperasjon 3, ble det kun påvist gassbobler hos et fåtall individer ved ultralydundersøkelse, også da først etter blod- eller gjelleprøvetaking. Det ble heller ikke funnet gassbobler i finner. Det ble i begge brønnbåtoperasjoner observert flere tilfeller av makroskopisk gass i atriet og lever i forbindelse med obduksjon. Funn av gassbobler makroskopisk ved obduksjon av fisk ved slakteransport tyder på at artefakter kan være en del av forklaringen, da disse fiskene ble eksponert for relativt små trykkdifferanser fra atmosfærisk trykk dvs. mindre grad av totalgassovermetning.

Det ser derfor ut til at gassbobler i hjertet ved obduksjon kan forekomme som et artefakt, men større mengde bobler og høyest prevalens i brønnbåtoperasjonen med størst totalgassmetning gjør at gassboblesyke ikke kan utelukkes som en forklaring i flere av tilfellene. For å skille mellom fatal gassboblesyke, iatrogen luftemboli og gass dannet fra bakteriell aktivitet etter døden, er det innen humanmedisinen etablert en makroskopisk gass-score for kvantifisering av mengde makroskopisk observerbar gass post mortem, med god diagnostisk verdi. Etablering av en lignende standardisert semi-kvantitativ score av makroskopisk gass hos fisk for bruk før større kar kuttes, kan bidra til å avklare årsaksforhold og mulig klinisk betydning av lignende funn i fremtiden.

Det var kun mindre forskjeller i velferdsscoringer samt histologiske undersøkelser hos fisk før lasting, etter lasting og etter lossing for alle tre brønnbåtoperasjoner. Dette tyder på at håndteringen av fisk medførte liten grad av synlige skader. For de to operasjonene som vurderes som mest belastende for fisken, brønnbåtoperasjon 1 og brønnbåtoperasjon 2, ble det imidlertid observert en økning i hematokrit underveis i behandlingen. Dette kan tyde på en viss fysiologisk påkjenning.

Ultralyd er trolig et egnet verktøy for diagnostisering av gassboblesyke i felt, men det er nødvendig med mer arbeid for å forstå det kliniske bildet og utvikle en mer optimal diagnostikkprotokoll.

4.6 Bruk av resultatene i næringen

Resultatene fra NYBRØK har allerede blitt lagt merke til og vært gjenstand for viktige diskusjoner i næringen. Funnene har bidratt til økt bevissthet rundt problemstillingene og gjort flere næringsaktører

oppmerksomme på utfordringene, spesielt knyttet til trykk og sink. I tillegg har næringen kommet med innspill til tema og kunnskapshull som NYBRØK-prosjektet ikke har klart å svare ut. Dette viser en vilje til endring og etablering av nye rutiner/bedre praksis i næringen som bidrar til bedre fiskevelferd og lavere dødelighet. Næringen har etterspurt mer kunnskap og flere undersøkelser, for på den måten å kunne identifisere veiledende grenseverdier for trykk, sink og eksponeringstid ved ulike forhold og vannkvaliteter. Etablering av slike grenseverdier, økt kunnskap om årsakssammenhenger og formidling av komplekse problemstillinger vil være til særdeles stor nytte for næringen.

4.7 Resultatenes bidrag til styrket bærekraft

Mer kunnskap om brønnbåtoperasjoner og effekter på fisk ved eksponering for endringer i trykk og høye sinkkonsentrasjoner under transport og ved behandling i brønnbåt vil bidra til bedre fiskevelferd/-helse og lavere dødelighet, både under og i etterkant av operasjonene. Samlet vil økt kunnskap bidra vesentlig til økt bærekraft i hele næringen, samt å redusere kostnader. Prosjektet støtter FNs bærekraftsmål 2, 9, 12 og spesielt 14. Delmål 2.4 omfatter bl.a. mål om "bærekraftige systemer for matproduksjon". Prosjektet vil øke bærekraften på produksjon av laks gjennom bedre håndtering og behandling av laks i brønnbåt. Delmål 12.2 sier at Norge innen 2030 skal oppnå en bærekraftig forvaltning og effektiv bruk av naturressurser. Forventet effekt av prosjektet er bedre fiskevelferd og redusert dødelighet etter håndtering og behandling i brønnbåt. Dette vil gi redusert råvareforbruk (fôr) og mer produsert biomasse per settefisk, som igjen betyr mer effektiv bruk av naturressurser. De samme forholdene vil bidra til å nå FNs bærekraftsmål 14 om livet i havet. Spesielt med kunnskapsgenerering og formidling som har som mål å forbedre fiskevelferd og driftsforhold, og dermed gjøre akvakultur som bruker av havressursene mer bærekraftig. Dette berører spesielt delmål 14.7. Økt tilgang til fisk kan ikke lenger dekkes gjennom tradisjonell fangst, men denne muligheten finnes innenfor akvakultur. Akvakultur bidrar derfor til delmål 14.4 om å sikre bærekraftig forvaltning av fiskebestandene.

5 Hovedfunn

Resultatene fra NYBRØK viste fiskevelferdsutfordringer og fiskedødelighet ved eksponering av fisk for redusert trykk og høye sinkkonsentrasjoner.

Høye sinkkonsentrasjoner

- Høye konsentrasjoner av totalt sink (800 µg/l) under simulert sjøvannstransport har effekter på ionereguleringen, men en robust postsmolt vil sannsynligvis tåle en slik belastning hvis den ikke utsettes for ytterligere belastning etter utsett i sjø.
- Høye konsentrasjoner av totalt sink (800 µg/l) under simulert ferskvannsbehandling med bløtt ferskvann førte til stressresponser, svekket evne til å osmoregulere, tydelige skader på gjellevev med nekrose av kloridceller og høy dødelighet etter overføring til sjøvann.
- Fysiologiske responser, gjelleskader og dødelighet var mer uttalt etter eksponering for høy dose totalsink i et behandlet ferskvannvann (partikkelfjerning og tilsatt silikatlut) sammenlignet med et ubehandlet ferskvann. I et behandlet ferskvann førte også moderate konsentrasjoner av totalsink (400 µg/l) til fysiologiske stressresponser og dødelighet.
- Basert på kunnskap om biotilgjengelighet av tungmetaller i ferskvann er den mest sannsynlige forklaringen på forskjellene i grad av fysiologiske effekter og dødelighet at det ubehandlede vannet inneholdt mer humus som binder Zn^{2+} og gjør det mindre giftig.
- Førsøkene viser at silikatlut ikke avgifter sink, under forhold relevante for brønnbåt.

Høye sinkkonsentrasjoner: utfyllende kommentarer og behov for videre forskning

Sink-førsøkene tydeliggjorde at høye konsentrasjoner av Zn^{2+} har en toksisk virkning på fisken, men det er ikke mulig å fastslå grenseverdier basert på de tre dosene som ble testet i forsoeket. Derfor bør det gjennomføres flere dose-responsforsøk for å etablere veiledende grenseverdier i ulike vannkvaliteter. Ferskvann produsert ved ultrafiltrering og revers osmose (RO) av sjøvann bør også inkluderes i nye forsoek. Dette vannet inneholder en del salt (Na^+ og Cl^-), men lite Ca^{2+} og Mg^{2+} (bløtt) og ikke noe humus. Det brukes i økende grad til ferskvannsbehandling av laks i brønnbåter. Fisken skiller ut betydelige mengder organisk materiale. Imidlertid er det lite sannsynlig at dette organiske fulvosmaterialet fra fisken binder tungmetaller like effektivt som humusmaterialet fra nedbørsfeltet. Derfor er det en del usikkerhet knyttet til tolkningen av hvordan TOC og fargerresultatene henger sammen med giftigheten til en gitt total konsentrasjon av sink, spesielt ved gjenbruk av vann, som i resirkulerende akvakultursystemer (RAS).

Eksponering for redusert trykk

- Laks kan få trykkfallssyke ved simulert lasting ved 0,4 ata, som er et trykk i ytterkant av dagens praksis i brønnbåtnæringa. Alvorlige kliniske symptomer oppsto etter ca. en time eksponering, og dødelighet ble registrert ved eksponering fra 65 minutter og oppover. I en eksponering på 113 minutter døde alle fisker. Det betyr at forekomsten og alvorlighetsgraden kan begrenses ved å redusere holdetiden.
- Trykkfallindusert gassbablesyke er vanskelig å avdekke i ettertid.
 - En høy andel av fisken posisjonerte seg lavt i vannsøylen ved eksponering for trykk på 0,4 ata. Adferdsavvik i form av hyperaktivitet, hypoaktivitet og likevektproblemer var en viktig støtte i den kliniske vurderingen ved trykkfallindusert gassbablesyke.
 - Visuell inspeksjon av særlig finner og gjeller er praktisk og nyttig diagnostisk.
 - Ultralyd viste seg å være et godt verktøy for å påvise gassbobler i systemisk sirkulasjon.
 - Angiotensin konverterende enzym, hematokrit, hemoglobin, score for exophthalmus og histologi ga liten eller ingen diagnostisk verdi.
- Laksen utviklet ikke gassbablesyke etter simulert lossing (komprimering til 2,6 ata og påfølgende dekomprimering) under de testede forholdene.

- Feltstudier viste et annet diagnostisk bilde enn kontrollerte forsøk. Makroskopisk synlige gassbobler i hjertet og hjertenære strukturer observert ved obduksjon, samt bobler påvist med ultralyd etter blodprøveuttak og/eller etter avliving var funn av interesse.
- Ved beregning av totalgassmetning, ved økt eller redusert trykk i brønnen i en brønnbåt, må det aktuelle lufttrykket inne i brønnen settes inn i formelen i stedet for det barometriske trykket, for å unngå feil verdier.
- Mulige prinsipper for endret brønnbåtdesign eller operasjonelle tiltak for å imøtegå utfordringer med trykkfallindusert gassboblesyke er identifisert

Eksposering for redusert trykk: utfyllende kommentarer og behov for videre forskning

Fiskeforsøkene i trykkammer viste at laks kan få trykkfallssyke under forhold som representerte ytterkant av det som benyttes i brønnbåter. Effekten av samtidig oksygenering i forbindelse med komprimering og dekomprimering ble ikke undersøkt i NYBRØK-forsøkene, og bør ses nærmere på. For å identifisere veiledende grenseverdier (tid og trykk) i ulike relevante scenarier, må det gjennomføres flere studier hvor eksponeringstid som funksjon av trykk vurderes. I tillegg bør tiltak som rekomprimering av fisken undersøkes, da dette kan tilsvare behandlingen som dykkere med trykkfallssyke får, og består i at dykkeren blir "blåst ned"/trykksatt på nytt til et gitt behandlingsdyp i trykkammer. Rekomprimering uten at det foreligger trykkfallssyke brukes også i spesielle dykkeprosedyrer, som kalles overflatedekompresjon. Rekompresjon kurativt eller som forebygging (profylakse) kan være mulig i brønnbåter.

6 Referanser

- Au, D.W.T., Pollino, C.A., Wu, R.S.S., Shin, P.K.S., Lau, S.T.F., Tang, J.Y.M. (2004). Chronic effects of suspended solids in gill structure, osmoregulation, growth, and triiodothyronine in juvenile green grouper *Epinephelus coioides*. *Mar Ecol Prog Ser* 266: 255-264.
- Barrett, J.C., Grossman, G.D., Rosenfeld, J. 1992. Turbidity-induced changes in reactive distance of rainbow trout. *Trans. Am. Fish. Soc.* 121: 437-443.
- Batzios, C., Fotis, G. and Gavrilidou, I. (1998). Economic dimension of gas bubble disease effects on rainbow trout culture. *Aquaculture International* 6, 451-455.
- Backström, T., Schjolden, J., Øverli, Ø., Thörnqvist, P.O. and Winberg, S., (2011). Stress effects on AVT and CRF systems in two strains of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) divergent in stress responsiveness. *Hormones and behavior*, 59(1), pp.180-186.
- Beyer, D.L., D'Aoust B.G., Smith L.S. (1976) Decompression-induced bubble formation in salmonids: comparison to gas bubble disease. *Undersea Biomed Res.* 3(4):321-38.
- Brønnbåtveilederen (2024). <https://brønnbatveilederen.no/>
- Colt, J. (1983). The computation and reporting of dissolved gas levels. *Water Res.* Vol. 17. No. 8 pp.841-849.
- Colt, J. (2012). Dissolved gas concentrations in water. Computation as functions of temperature, salinity and pressure. Second edition.
- D'Aoust, B.G. and Smith, L.S. (1974) Bends in fish. *Comparative Biochemistry and Physiology* 49A, 311-321.
- Espmark, Å.M., Kolarevic, J., Aas-Hansen, Ø. og Nilsson, J., (2015). Pumping og håndtering av smolt. Rapport FHF prosjekt nr. 900660.
- Espmark, Å. M. O., Humborstad, O. B., & Midling, K. Ø. (2012). Pumping av torsk og laks, faktorer som påvirker velferd og kvalitet. Nofima rapportserie.
- Espmark, Å.M., Midling, K.Ø., Nilsson, J., Humborstad, O.-B., (2016). Effects of Pumping Height and Repeated Pumping in Atlantic Salmon salar. *Natural Resources* 7, 377-383.
<https://doi.org/10.4236/nr.2016.76032>
- Farrell, A.P., Wood, C.M., Brauner, C.J., (2011). *Fish Physiology: Homeostasis and Toxicology of Essential Metals*. Academic Press.
- Fivelstad, S., Schwarz, J., Strømsnes, H., & Olsen, A. B. (1995). Sublethal effects and safe levels of ammonia in seawater for Atlantic salmon postsmolts (*Salmo salar* L.). *Aquacultural Engineering*, 14(3), 271-280.
- Grøntvedt R.N., Nerbøvik I.K.G., Viljugrein H., Lillehaug A., Nilsen H, Gjevre A.G. (2015) Thermal de-licing of salmonid fish - documentation of fish welfare and effect. Norwegian Veterinary Institute's Report series, Report 13. Norwegian Veterinary Institute. ISSN: 1890-3290
- Hess-Erga O-K., Storsul T., Rønnestad I., Segadal K., Dalum A.S., Stensby-Skjærvik S., Wahl-Ovesen H., Calabrese S., Sandstad A.R., Andersen L., Solerød M. og Handegård R. (2023a). Gassovermetning i oppdrettsnæringen, del 1: Hva betyr totalgasstrykk, trykkfall og når er det fare for bobledannelse. *Norsk Fiskeoppdrett* Nr. 10.
- Hess-Erga O-K., Storsul T., Rønnestad I., Segadal K., Dalum A.S., Stensby-Skjærvik S., Wahl-Ovesen H., Calabrese S., Sandstad A.R., Andersen L., Løseth K., Eide S.H., Sjøstrand M.V., Abdo H.A., Myklebust A.T., De Waal G., Solerød M. og Handegård R. (2023b). Laks utviklet trykkfallssyke under simulert lasting. *Norsk Fiskeoppdrett* Nr. 10.
- Hogstrand, C., Verbost, P.M., Bonga, S., Wood, C.M., (1996). Mechanisms of zinc uptake in gills of freshwater rainbow trout: interplay with calcium transport. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology* 270(5), R1141-R1147.

- Huchzermeyer, K.D. (2003) Clinical and pathological observations on *Streptococcus* sp. infection on South African trout farms with gas supersaturated water supplies. *Onderstepoort Journal of Veterinary Research* 70, 95–105.
- Kristensen T., Åtland Å., Rosten T., Urke H.A. and Rosseland B.O. (2009). Important influent-water quality parameters at freshwater production sites in two salmon producing countries. *Aquacultural Engineering* 41: 53–59
- Machado, J.P., Garling, D.L., Kevern, N.R., Trapp, A.L. and Bell, T.G. (1987) Histopathology and pathogenesis of embolism (gas bubble disease) in rainbow trout (*Salmo gairdneri*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 44, 1985–1994.
- Mesa, M.G., Weiland, L.K., Maule, A.G. (2000) Progression and Severity of Gas Bubble Trauma in Juvenile Salmonids. *Transactions of the American Fisheries Society, Western Fisheries Research Center*, Taylor & Francis. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(2000\)129<0174:PASOGB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(2000)129<0174:PASOGB>2.0.CO;2)
- Noble, C., Nilsson, J., Stien, L.H., Iversen, M.H., Kolarevic, J., Gismervik, K., (2018). Velferdsindikatorer for oppdrettslaks: Hvordan vurdere og dokumentere fiskevelferd. FHF prosjekt nr. 901157
- Pleizier, N. K., Algera, D., Cooke, S. J., & Brauner, C. J. (2020). A metaanalysis of gas bubble trauma in fish. *Fish and Fisheries*. <https://doi.org/10.1111/faf.12496>
- Pulg, U., Isaksen, T.E., Velle, G., Stranzl, S., Espedal, E.O., Vollset, K.W., Bye-Ingebrigtsen, E., Barlaup, B.T. (2018). Gassovermetning i vassdrag – en kunnskapsoppsummering. *Uni Research Miljø LFI rapport* 312. *Uni Research Bergen*. ISSN: 1892-8889
- Rosten, T., (2010). Forutsetninger for optimalisering av systemer for transport av levende fisk i brønnbåt. Artikkel fra NIVA i VANN 03.
- Roth, B. (2016) Avlusing av laksefisk med Optilice: Effekt på avlusing og fiskevelferd. *Nofima rapport* 59/2016. *Nofima*. ISBN: 978-82-8296-458-6
- Sommerset I, Walde C.S., Bang Jensen B., Wiik-Nielsen J., Bornø G., Oliveira V.H.S., Haukaas A. og Brun E. 2022. Fiskehelserapporten 2021. Veterinærinstituttets rapportserie. nr. 2a/2022.
- Speare, D.J (2010). Disorders Associated with Exposure to Excess Dissolved Gases. In Leatherland J.F. and Woo, P.T.K.(Eds.), *Fish Diseases and Disorders, Volume 2, Non-infectious Disorders* (2nd ed., pp. 342–356). *CABI*
- Sprague, J.B., (1964a). Avoidance of Copper-Zinc Solutions by Young Salmon in the Laboratory. *Journal Water Pollution Control Federation* 36, 990–1004.
- Sprague, J.B., (1964b). Lethal Concentrations of Copper and Zinc for Young Atlantic Salmon. *J. Fish. Res. Bd. Can.* 21, 17–26. <https://doi.org/10.1139/f64-003>
- Sprague, J.B., Ramsay, B.A., (1965). Lethal Levels of Mixed Copper–Zinc Solutions for Juvenile Salmon. *J. Fish. Res. Bd. Can.* 22, 425–432. <https://doi.org/10.1139/f65-042>
- Stensby-Skjærvik S., Storsul T., Boissonnot L., Calabrese S., Svendsen F.S., Hess-Erga O-K., Dalum A.S. (2024). NYBRØK - Effekt av vannkvalitet, akkumulerte stoffer og trykkforhold på laks ved tre ulike brønnbåtoperasjoner. Feltrapport AP2.2 og AP3.3. FHF-prosjektnummer 901788 «Ny brønnbåtkunnskap – biologiske risikofaktorer ved bruk av brønnbåt til transport og behandling av laks (NYBRØK)».
- Storsul T., Karlsen C., Brandshaug O.K., Nytrø A.V., Larsen S-V., Hess-Erga O-K., Jonassen T.M. og Boissonnot L. (2023). Erfaringsbasert kunnskap kan brukes til å bedre fiskevelferd under brønnbåtoperasjoner. *Norsk Fiskeoppdrett* Nr. 12.
- Storsul T., Dalum A.S., Stensby-Skjærvik S., Segadal K., Løseth K., Andersen L., Eide S.H., Handegård R., Wahl-Ovesen H., Hess-Erga O-K., Calabrese S. og Rønnestad I. (2024). Gassovermetning i oppdrettsnæringen, del 2: Hvor stort trykkfall tåler fisken? *Norsk Fiskeoppdrett* Nr. 4.
- Tang, S., Thorarensen, H., Brauner, C.J., Wood, C.M., Farrell, A.P., (2009). Modeling the accumulation of CO₂ during high density, re-circulating transport of adult Atlantic salmon, *Salmo salar*, from observations aboard a sea-going commercial live-haul vessel. *Aquaculture* 296, 102–109. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2009.07.020>

- VKM, (2008). Transportation of fish within a closed system. Rapport 23. Norwegian Scientific Committee for Food Safety.
- Vogt R.D., Calabrese S., Steigum E., Svendsen F.S., Ulven K., Dalum A.S., Andersen L., Lai F., Sjøstrand M.V., Wedaa L., Hanson O. og Hess-Erga O-K. (2024). Laks påvirkes negativt av sink. Norsk Fiskeoppdrett Nr. 4.
- Wedemeyer, G. A., & Wedemeyer, G. A. (1996). Interactions with water quality conditions. *Physiology of Fish in Intensive Culture Systems*, 60-110.
- Weitkamp, D.E. and Katz, M. (1980) A review of dissolved gas supersaturation literature. *Transactions of the American Fisheries Society* 109, 659–702.
- Zitko, V., Carson, W.G., (1977). Seasonal and Developmental Variation in the Lethality of Zinc to Juvenile Atlantic Salmon (*Salmo salar*). *J. Fish. Res. Bd. Can.* 34, 139–141. <https://doi.org/10.1139/f77-01>

7 Leveranser

Dato	Leveranse
19.10.22	Referat fra oppstartsmøte med prosjektgruppe og referansegruppe
31.12.22	Statusrapport FHF
30.06.23	Referat fra statusmøter med referansegruppe og prosjektgruppe
30.06.23	Statusrapport FHF
28.09.23	Populærvitenskapelig artikkel, videosnutter og artikkel til partnernes nettsider Hess-Erga O-K., Storsul T., Rønnestad I., Segadal K., Dalum A.S., Stensby-Skjærvik S., Wahl-Ovesen H., Calabrese S., Sandstad A.R., Andersen L., Solerød M. og Handegård R. (2023). Gassovermetning i oppdrettsnæringen, del 1: Hva betyr totalgasstrykk, trykkfall og når er det fare for bobledannelse. Norsk Fiskeoppdrett Nr. 10. Hess-Erga O-K., Storsul T., Rønnestad I., Segadal K., Dalum A.S., Stensby-Skjærvik S., Wahl-Ovesen H., Calabrese S., Sandstad A.R., Andersen L., Løseth K., Eide S.H., Sjøstrand M.V., Abdo H.A., Myklebust A.T., De Waal G., Solerød M. og Handegård R. (2023). Laks utviklet trykkfallssyke under simulert lasting. Norsk Fiskeoppdrett Nr. 10. https://www.niva.no/prosjekter/nybrok
28.08.23	Abstract til presentasjon på AquaNor (i samarbeid med BRØK).
30.01.24	Referat fra statusmøter med referansegruppe og prosjektgruppe
31.12.23	Statusrapport FHF
15.03.24	Foredrag på Veterinærdagene 2024; Gassbobler i fisk – betyr trykkendringer mer enn vi har trodd?
18.04.24	Foredrag på Smoltinaret i Trondheim (arrangert av Åkerblå); Gasser i vann – hva må man tenke på?
08.05.24	Populærvitenskapelig artikkel, videosnutter og artikkel til partnernes nettsider Storsul T., Dalum A.S., Stensby-Skjærvik S., Segadal K., Løseth K., Andersen L., Eide S.H., Handegård R., Wahl-Ovesen H., Hess-Erga O-K., Calabrese S. og Rønnestad I. (2024). Gassovermetning i oppdrettsnæringen, del 2: Hvor stort trykkfall tåler fisken? Norsk Fiskeoppdrett Nr. 4. Vogt R.D., Calabrese S., Steigum E., Svendsen F.S., Ulven K., Dalum A.S., Andersen L., Lai F., Sjøstrand M.V., Wedaa L., Hanson O. og Hess-Erga O-K. (2024). Laks påvirkes negativt av sink. Norsk Fiskeoppdrett Nr. 4.

24.05.24	<i>Presentasjon for Mattilsynet. NYBRØK, Effekt av vannkvalitet under transport og behandling og Gassmetning i vann og effekt på laks under transport og ved behandling i brønnbåt.</i>
21.06.24	Abstract: AQUA 2024: - <i>Water quality issues caused by zinc and gas supersaturation during simulated well boat operations of Atlantic salmon.</i> Havbruk 2024: - <i>Effekter av sink på fisk under forhold relevante for brønnbåtsoperasjoner.</i> - <i>Kan laks få trykkfallssyke av brønnbåtsoperasjoner?</i>
30.06.24	<i>Statusrapport FHF</i>
28.08.24	<i>Presentasjon under AQUA 2024. Water quality issues caused by zinc and gas supersaturation during simulated well boat operations of Atlantic salmon</i>
02.09.24	<i>Avslutningsmøte med prosjekt- og ref. gruppe med gjennomgang av utkast til sluttrapport</i>
25.09.24	Manuskript til 2 vitenskapelige artikler vedr. trykkeffekter og vannkvalitet Manus 1: Foreløpig tittel: «Gas bubble disease in Atlantic salmon (<i>Salmo salar</i> L.) caused by decompression protocols relevant for well boat operations» Manus 2: Foreløpig tittel: «Elevated zinc levels during well boat operations - a welfare problem for Atlantic salmon (<i>Salmo salar</i>)»
25.09.24	<i>Delrapport: Effekt av vannkvalitet, akkumulerte stoffer og trykkforhold på ved tre ulike brønnbåtsoperasjoner. Feltrapport AP2.2 og AP3.3.</i>
25.09.24	<i>Faglig sluttrapport i tråd med FHF's retningslinjer</i>
18.11.24	<i>Administrativ sluttrapport i tråd med FHF's retningslinjer</i>



Norges ledende kompetansesenter på vannmiljø

Norsk institutt for vannforskning (NIVA) er Norges viktigste miljøforskningsinstitutt for vannfaglige spørsmål, og vi arbeider innenfor et bredt spekter av miljø, klima- og ressurssspørsmål. Vår forskerkompetanse kjennetegnes av en solid faglig bredde, og spisskompetanse innen mange viktige områder. Vi kombinerer forskning, overvåkning, utredning, problemløsning og rådgivning, og arbeider på tvers av fagområder.