# TILPASNINGER I LAKSELUS TIL FERSKVANNSBEHANDLINGER

## Sluttrapport for FERSKLUS prosjektet

Sussie Dalvin og Rasmus Skern (HI)



**RAPPORT FRA HAVFORSKNINGEN NR. 2026-5**

**Tittel (norsk og engelsk):**

Tilpasninger i lakselus til ferskvannsbehandlinger

Adaptations in salmon lice in response to low salinity

**Undertittel (norsk og engelsk):**

Sluttrapport for FERSKLUS prosjektet

Final report from the *Fersklus* project


| **Rapportserie:** | **År - Nr.:** | **Dato:** |
|---|---|---|
| Rapport fra havforskningen | 2026-5 | 29.01.2026 |

ISSN:1893-4536



**Forfatter(e):**

Sussie Dalvin og Rasmus Skern (HI)

Forskningsgruppeleder(e): Monica F. Solberg (Smittespredning og sykdom)
Godkjent av: Forskningsdirektør(er): Geir Lasse Taranger
Programleder(e): Mari Skuggedal Myksvoll



**Distribusjon:**

Åpen

**Prosjektnr:**

15993

**Oppdragsgiver(e):**

FHF

**Oppdragsgivers referanse:**

901875

**Program:**

Miljøeffekter av akvakultur

**Forskningsgruppe(r):**

Smittespredning og sykdom

**Antall sider:**

23

**Sammendrag (norsk):**

Prosjektet «Fersklus – Tilpasning i lakselus til vann med lav saltholdighet» hadde som mål å undersøke om gjentatte ferskvannsbehandlinger i oppdrett kan føre til økt toleranse for brakkvann eller ferskvann hos lakselus. Prosjektet ble gjennomført over 26 måneder og omfattet innsamling av lakselus fra felt, etablering av lakselusstammer i laboratoriet og eksponering av disse med ferskvann gjennom fire generasjoner, samt tester av brakkvannstoleranse hos avkom. Endringer i larvetoleranse og konsekvensene av dette for smitterisiko ble illustrert ved bruk av hydrodynamisk modellering.

Resultatene viser at lakselus i naturen har stor variasjon i brakkvannstoleranse, og at nylig innsamlet lus generelt tåler brakkvann bedre enn laboratoriestammer. Denne toleransen ble imidlertid redusert når lus ble holdt i sjøvann over flere generasjoner. Gjentatte ferskvannsbehandlinger over fire generasjoner førte til en liten, men målbar økning i brakkvannstoleranse hos avkommet, men forskjellen var svært liten og vurderes å ha begrenset biologisk betydning. Målinger av tilsvarende effekter på voksne lus ga ikke resultater.

Samlet sett tyder funnene på at ferskvannsbehandling ikke gir grunnlag for en rask evolusjonær styrking av brakkvannstoleranse hos lakselus. Toleranseegenskaper ser ut til å være både variable mellom individer, og avhenger av miljøeksponering over tid. Prosjektet gir nyttig kunnskap for vurdering av ferskvannsbehandling som miljøvennlig avlusingstiltak og bidrar til bedre forståelse av risikobildet knyttet til kontrollstrategier basert på ferskvann.

**Sammendrag (engelsk):**

The project “Fresh lice – Adaptation of salmon lice to low-salinity water” aimed to investigate whether repeated freshwater treatments in aquaculture can lead to increased tolerance to brackish or freshwater in salmon lice. The project was carried out over 26 months and included the collection of salmon lice from the field, the establishment of salmon lice strains in the laboratory and their exposure to freshwater over four generations, as well as tests of brackish water tolerance in offspring. Changes in larval tolerance and the consequences of this for infection risk were illustrated using hydrodynamic modeling.

The results show that salmon lice in nature have a large variation in brackish water tolerance, and that recently collected lice generally tolerate brackish water better than laboratory strains. However, this tolerance was reduced when lice were kept in seawater over several generations. Repeated freshwater treatments over four generations led to a small but measurable increase in brackish water tolerance in the offspring, but the difference was very small and is considered to have limited biological significance. Measurements of similar effects on adult lice did not yield results.

Overall, the findings suggest that freshwater treatment does not provide a basis for a rapid evolutionary strengthening of brackish water tolerance in salmon lice. Tolerance traits appear to be both variable between individuals and dependent on environmental exposure over time. The project provides useful knowledge for the assessment of freshwater treatment as an environmentally friendly delousing measure and contributes to a better understanding of the risk picture associated with freshwater-based control strategies.

# Innhold


**1 Innledning** 5

1.1.1 ***Prosjektets omfang*** 5

1.1.2 ***Prosjektets organisering*** 5

**2 Problemstilling og formål** 7

2.1.1 *Prosjektets effektmål* 7

2.1.2 *Prosjektets resultatmål* 7

**3 Prosjektgjennomføring** 8

3.1.1 *Beskrivelse av metodikk* 8

3.1.2 *Gjennomføring av prosjektet* 11

**4 Oppnådde resultater, diskusjon og konklusjon** 13

4.1.1 *Vurdering av funnene* 18

4.1.2 *Vurdering av mulighetene for anvendelse av resultater fra prosjektet i næringen og bidrag til styrket bærekraft* 19

**5 Hovedfunn** 20

**6 Referanser** 21

**7 Leveranser** 22

# 1 - Innledning

**Faglig bakgrunn for at prosjektet:**

Bruken av ferskvann og brakkvann som behandling baserer seg på at lakselusen er en marin parasitt som er isoosmotisk i sjøvann og har lite evne til å opprettholde en normal saltholdighet i kroppen i vann med lav saltholdighet (Hahnenkamp og Fyhn 1985). Når lakselusen utsettes for ferskvann vil frittlevende stadier la seg synke til dypere og saltere vannlag, mens lakselus på fisk må forsøke å overleve lengst mulig. Nypåslåtte kopepoditter er likeledes svært sensitive, mens chalimus larver og de senere mobile stadier er mindre følsomme (Wright mfl. 2016). Lakselus på fisk tilpasser seg sannsynligvis ved å sitte mest mulig i ro tett på fisken slik at kroppens overflate i mindre grad utsettes for ferskvann og kan også til en viss grad kompensere for tap av salter ved å spise blod og hudceller fra fisken. Lakselus kan derfor overleve en god stund på fisk i ferskvann, men tåler ikke ferskvann over lengere tid. Dette er godt kjent fra laksefisk som trekker opp i elv enten pga. prematur tilbakevandring med formål å avluse seg (sjøørret) eller i forbindelse med gyting.

Lakselusen sin toleranse for vann med lav saltholdighet har stor betydning for smitte av ny fisk. Kopepoditter unngår vann som ikke har full saltholdighet, men laboratorieforsøk viser at en mindre andeler av populasjonen likevel vil søke oppover mot lys, sjøl om de da må svømme inn i ferskere vann (Crosbie mfl. 2019). Dette kan være fordelaktig i det naturlige økosystemet hvor laksefisker ofte oppholder seg i det ferskere overflatevann i fjordene. Hvis bruken av ferskvann til avlusing i oppdrett medfører større toleranse hos lakselus kan konsekvensen bli at en større andel av kopepoditter betre tåler lav saltholdighet og posisjonerer seg i de ferskere overflatelag med større forekomst av fisk

Økt toleranse, adapsjon, overfor vann med lav saltholdighet vil derfor være negativt for håndtering og bekjempelse av lakselus. For oppdrettsfisken vil en slik tilpasning minske beskyttelse mot ny smitte som fersk- og brakkvann kan utgjøre i øvre vannlag. Dette vil redusere effekten av preventive midler som snorkel med ferskvannslokk og kan potensielt redusere muligheten til å fjerne lus fra fisk med ferskvann. For villfisken vil en slik tilpasning øke smittepresset på utvandrende smolt og redusere marine leveområder (sjøørret og røye).

Tidligere forsøk med lakselus har vist store variasjoner i adferdsrespons og toleranse overfor miljøutfordringer mellom dyr innsamlet på samme lokalitet (Andrews mfl. 2020, Coates mfl. 2020, Ljungfeldt mfl. 2017). Dette viser at lokale lakselusforekomster er sammensatt av dyr med ulike egenskaper. Nordatlantisk lakselus må betraktes som en sammenhengende populasjon og forskjeller mellom områder kan derfor forventes å være mindre og transiente (Glover mfl. 2011). Dette betyr at det er stort potensiale for seleksjon av lus med tilpasning til lavere saltholdighet og at en slik tilpasning vil kunne spre seg til hele Nord-Atlanteren.

Ferskvannsbehandlinger brukes i i oppdrett, og forsøk har vist at ferskvann kan være en effektiv lusebehandling som fjerner flere lus enn både varmt vann og mekanisk spyling. I de senere år er kombinasjonen av ferskvann og de ovennevnte metoder brukt i stigende grad. Der er derfor et stort behov for å dokumentere om bruken av ferskvann kan ha innflytelse på lakselusen og hvordan det eventuelt kan endre på egenskapene til lakselusen.

### 1.1.1 - Prosjektets omfang

Prosjektet var organisert i fire arbeidspakker. AP1 innsamlet og avlet lakselus og gjennomførte ferskvannsbehandlinger, AP2 undersøkte effekter av ferskvannsbehandling i lakselusen, AP3 utførte hydrodynamisk modellering og AP4 håndterte ledelse og kommunikasjon. Totalt budsjett var på 4.2861.000 NOK med en total prosjektperiode på 26 måneder.

### 1.1.2 - Prosjektets organisering

Prosjektet ble ledet av Sussie Dalvin som sammen med Rasmus Skern-Mauritzen og en rekke ingeniører gjennomførte undersøkelser og dataanalyse. Alle eksperimentelle forsøk ble utført på laboratoriet til Havforskningsinstituttet på Nordnes, Bergen. Referansegruppen bestod av Lisbeth Løvmo Martinsen (nå Salmar ASA), Pål Skjold (Lerøy Seafood Group ASA) og Gro Vee (MOWI ASA). FHF ble representert av Eirik Ruud Sigstadstø.

# 2 - Problemstilling og formål

### 2.1.1 - Prosjektets effektmål

Prosjektet har sett på effekten av ferskvannsbehandlinger på lakselus. Ferskvannsbehandlinger er effektive (spesielt i kombinasjon med termisk/mekanisk metoder) og brukes derfor i utstrakt grad i næringen. Som med al behandling, vil en liten andel av ferskvannsbehandlet lus overleve og der er knyttet bekymring til om slike lakselus kan gi opphav til nye lus som mer tolerant overfor brakkvann. Ferskvannsbehandling er i utgangspunktet en miljøvennlig metode med god fiskevelferd og det er derfor veldig viktig å dokumentere eventuelle uheldige effekter av metoden i arbeidet med å utvikle en bærekraftig industri.

Målet for prosjektet var derfor: å undersøke om bruk av ferskvannsbehandlinger kan indusere en adaptiv respons i lakselusen som gjør den mer resistent overfor ferskvanseksponering?

Dette spørsmålet ble adressert ved å utføre følgende undersøkelser:

-beskrive den eksisterende toleranse i feltinnsamlet lus og etablere brakkvannstolerante stammer.

-Kvantifisere adaptive endringer i evne til å sitte fast hos voksne lus i de etablerte stammene etter gjentakende ferskvanneksponeringer.

-Beskrive kopepodittenes unnvikelsesrespons til lavere saltholdighet i de etablerte stammene etter gjentakende ferskvanneksponeringer.

- Modellere hvordan adapsjon påvirker smittepress av lakselus og estimere konsekvensene for laksefisk.

### 2.1.2 - Prosjektets resultatmål

Resultatet av de ovenstående undersøkelser gir oss informasjon om

-i hvilken grad lakselus nyinnsamlet fra en oppdretssmerd unnviker brakkvann og hvor stor variasjon er mellom avkom fra ulike mødre?

-hvordan gjentakende eksponeringer for ferskvann kan endre en slik respons i avkommet, altså om effekten kan nedarves?

-i hvilken grad en slik eksponering også vil endre effekten av ferskvann på voksne lakselus?

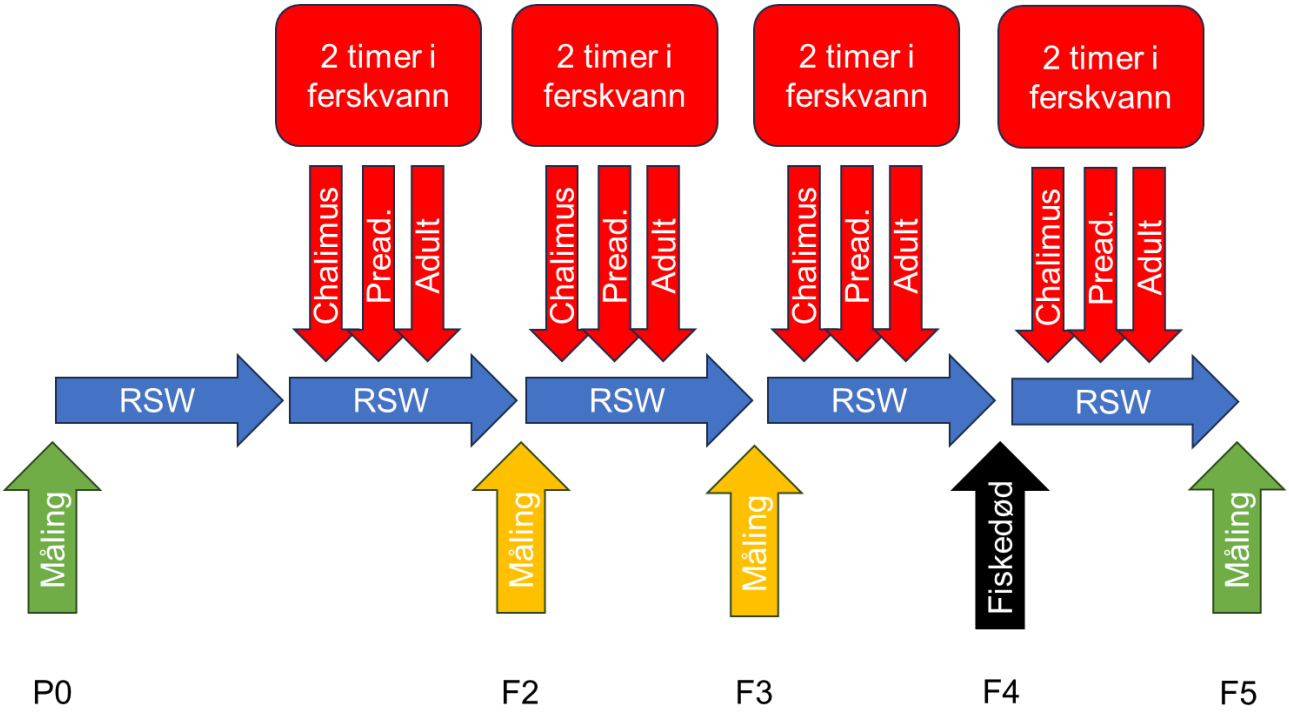
-hvilke effekter kan endret respons på brakkvann hos lakseluslarver ha på spredningsmønstre?

# 3 - Prosjektgjennomføring

### 3.1.1 - Beskrivelse av metodikk

**Lakselus**: Startpunktet for forsøkene var innsamling av lakselus. Vi valgte å bruke nylig innsamlet lakselus fordi tidligere forsøk (under publisering) hadde vist at laboratoriestammer av lakselus har en langt mindre toleranse overfor brakkvann end lus innsamlet fra anlegg. Vi valgte å samle inn lus fra bare et anlegg som hadde brukt ferskvann tidligere av en rekke årsaker: 1) det er godt dokumentert at variasjonen mellom individuelle lus fra en lokalitet er like stor som variasjonen mellom lokaliteter (Ljungfeldt mfl. 2017), 2) Der er ikke observert større toleranse i områder som er mer ferskvannspåvirket end andre (Helgesen mfl. 2022), 3) ferskvannsbruk i oppdrett er så vanlig at kombinert med den store transporten av lus som skjer kontinuerlig langs norskekysten var det ikke mulig å prøveta lus som vi kunne være trygge på var upåvirket av tidligere eksponering til ferskvann. I tillegg til nyinnsamlet lakselus inkluderte forsøket en lakselus-laboratorielinje (LsOslo) for å kunne sammenlikne med tidligere resultat.

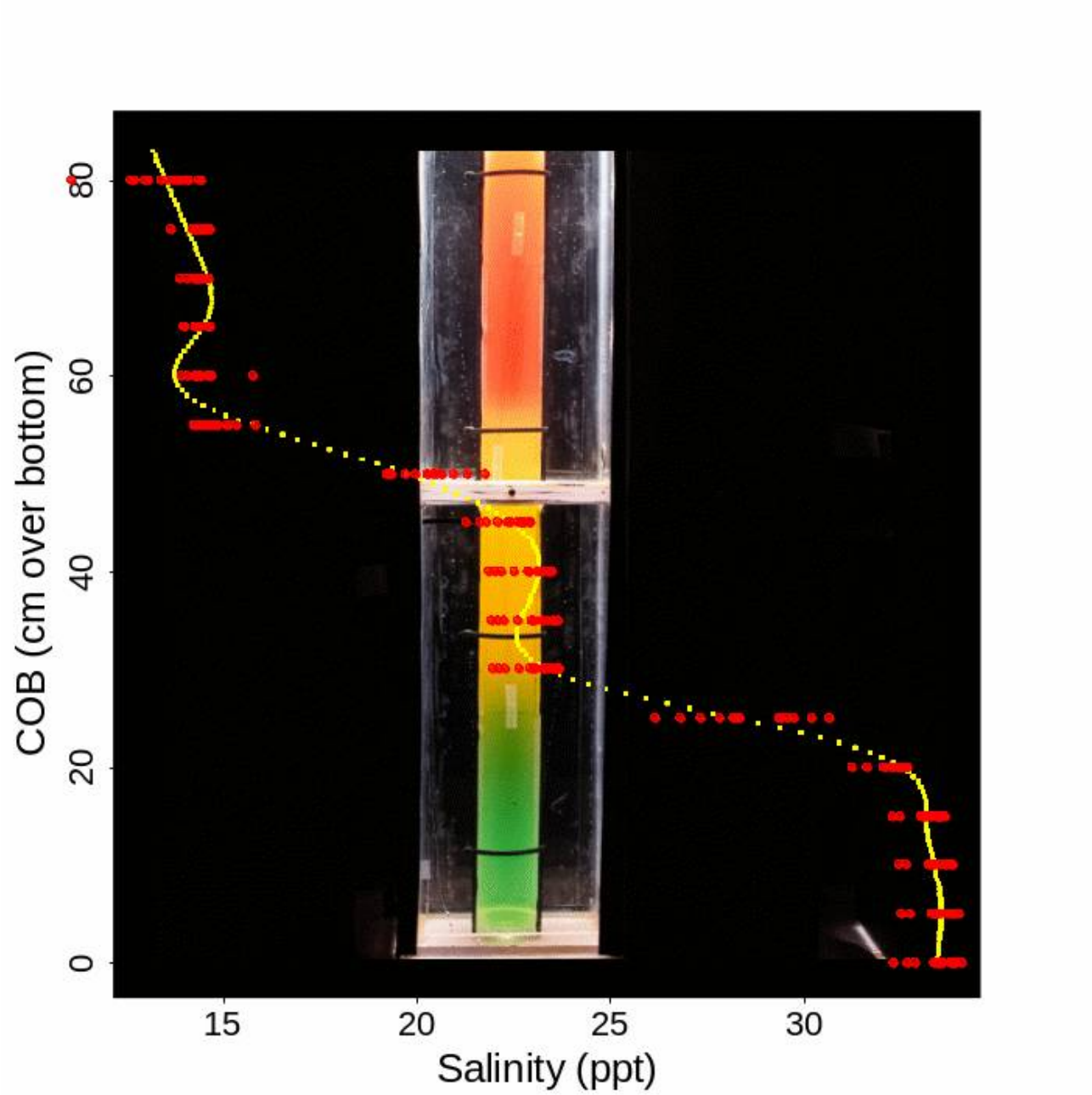
**Ferskvannsbehandlinger**: For å undersøke effekten av ferskvann under mest mulig realistiske forhold sammenlignet med en behandling, besluttet vi å behandle lakselusen med ferskvann mens de var på fisk. Vi behandlet med rent ferskvann, men bare i 2 timer siden vi var avhengig av å ha et begrenset tap slik at vi fremdeles hadde lus tilgjengelig for test og videreføring til neste generasjon. Behandlingen ble utført med en 30 min gradvis senkning av saltholdighet og tilsvarene 30 mins tilbakeføring til full saltholdighet etter 2 timer på ferskvann. Vi behandlet 3 ganger per generasjon, når lakselusen var i chalimus 2 stadiet, i preadulte 2 stadiet og i det voksne stadiet (sirka 15, 22 og 45 dager etter smitte). Behandlingen ble gjentatt for å få størst mulig påvirkning og øke sjansen for å oppdage eventuelle tilpasninger. Når de voksne hunner hadde produsert deres andre eggstreng (eller senere) ble eggene høstet og brukt til å videreføre neste generasjon og til undersøkelser av deres toleranse (se neste punkt). Ferskvannsbehandlinger ble utført i fire på hverandre følgende generasjoner (Fig. 1.). Larver av de innsamlet hoer ble målt så snart de kom inn i laboratoriet (P0-F1) og i andre, tredje og femte generasjon (F2, F3, F5).




*Figur 1: Oversikt over forsøksgang med ferskvannsbehandlinger. P0, F2-5 refererer til lakselus generasjonen. RSW er sjøvann (running sea water). Gule piler referer til målinger med ny type kolonne, mens grønne er med den originale type.*

**Avvik i hold av lus.** Da lakselusen var blitt voksne i fjerde generasjon opplevde vi svikt i vanntilførsel på våtlabben som medførte mortalitet hos fisken. Heldigvis ble dette oppdaget og lusen ble fjernet fra fisken (svart pil, Figur 1). Egg fra voksne hoer klekket og vi hadde nok kopepoditter til å overføre til neste generasjon. Lusen har sannsynligvis opplevd suboptimale oksygen nivåer og stresset fisk, men dette gjaldt alle tanker med fisk, kontroller og behandlet. Basert på den relativ gode klekking og normale utvikling til kopepoditter med god smitteevne, vurderte vi at disse lakselus kunne brukes fremover.

**Brakkvannstoleranse hos kopepoditter**: For å undersøke kopepoditters adferd og mer spesifikt deres toleranse overfor brakkvann målte vi hvordan larvene valgte å plassere seg i kolonner med ulike soner av brakk og sjøvann ved 9,5 °C (Figur 2). Kolonnene hadde tre soner, hvor den nederste hadde sjøvann (34 ppt), den mellomste brakkvann (24 ppt) og den øverste ferskere brakkvann (14 ppt). Kopepoditter ble tilsatt i bunnen. Hver kolonne ble kjørt med avkommet fra en hun og alle kopepoditter var 9,5 dage etter klekking (+-1 døgn). Kolonnene ble dekket til og en lyskilde (Phillips Hue Ambiance 6W A60, ‘frosty dawn’ full intensitet) plassert i toppen for å tiltrekke larvene oppover. Posisjonen til alle kopepoditter ble avlest etter en time.




*Figur 2. Kolonne bruk til å undersøke kopepoditters adferd i brakkvann. Vannet er for illustrasjonenes skyld farget med fruktfarge. Grønt vann har en saltholdighet på 34, gult vann på 24 og rødt vann 14. Grafen (gul) illustrerer modellert saltholdighet, mens de røde prikker viser målinger av saltholdighet.*

**Karoppsett**: Basert på resultatet av brakkvannstoleranse forsøkene utvalgte vi de tre mest og tre minst tolerante grupper av avkom til videreføring av neste generasjon. Den ene av de minst tolerante grupper ble valgt fra en labstamme av lus; LsOslo. Videreføring av disse lus ble utført i 9 tanker: Kar1-3, avkom av mest tolerante lus 1-3, alle ble ferskvannsbehandlet. Kar 4-9 avkom av de tre mest følsomme (minst tolerante) lus. Kar 4-6 ble ferskvannsbehandlet. Kar 7-9 ble holdt på 34 ppt sjøvann kontinuerlig.

**Kolonnedesignutvikling**: Kopepoditter ble testet i kolonner som tidligere er brukt til denne typen av målinger (Crosbie et al 2019). Vi brukte samme teknikk til å fylle kolonne og tilsette larver som beskrevet tidligere. Siden disse kolonner var arbeidskrevende og til dels usatt for bruker bias, utviklet vi nye kolonner. Prinsippet i begge

typer av kolonner er at der er full saltholdighet i bunnen, men «mørkt». Lusen tiltrekkes av lys i toppen av kolonnen, men her oppe må den tåle lav saltholdighet og resultatet viser da hvor stor en andel av lusen som foretrekker å tåle lav saltholdighet mot å få være i lyset. Lyskilder og temperaturer er identiske. Kolonnene var dermed basert på samme prinsipp, men i de nye kolonner var kolonnen firkantet og bygget av lettere og mer gjennomsiktig materiale for å lette avlesning og håndtering. Dessverre viste disse kolonner å gi mindre tydelige resultater end de gamle kolonne. Trenden var det samme, men forskjeller var mindre. Videre analyse av dette problemet (mot slutten av prosjektet) antydet at hovedproblemet med de nye kolonner var at limen som holdt kolonne sammen ledet lyset ned i striper langs kolonnen slik at lyset som vanligvis bare stråler fra toppen ble spredt. Dermed ble lusen sin tiltrekning mot lyset (og brakkere vann) langt mindre. Slik ble de første målinger og den siste generasjonen gjennomført med de gamle kolonner, mens andre og tredje generasjon ble gjort med de nye kolonner (Figur 1).

**Brakkvannstoleranse i voksne**: For å undersøke voksne lakselus sin toleranse overfor brakkvann, brukte vi først en tidligere publisert metode (Andrews mfl. 2020). Metoden baserer seg på eksponering av lus med vann av lav saltholdighet og vurderer deres evne til aktivt å holde seg fast på overflater. Denne metoden var en modifisering av protokollen utviklet av Andrews og Horsberg 2020, fordi denne var basert på et relativt stort antall lakselus (>60) pr. gruppe. Modifiseringen gik ut på å gradvis endre saliniteten i samme gruppe for å se når lusene mistet evnen til å holde seg i testsystemet. Modifiseringen viste seg å være uegnet til å finne forskjeller i materialet vi hadde tilgjengelig fordi gruppene var små og størsteparten overlevede. Vi forsøkte derfor å modifisere protokollen og undersøkelsen ble derfor utført ved å se på overlevelse i brakkvann med svært lite salt (2ppt). Voksne lakselus (både hanner og hunner) ble tatt av fisken og plassert i begerglass ved samme temperatur som fisken de kom fra (ca. 9,5 °C). Overlevelse ble målt ved å rotere begerglasset. Alle dyr som ikke klarte å holde seg fast og sank til bunns når glasset ble satt på et bord ble vurdert som ute av stand til å håndtere behandlingen og ble fjernet. Med denne metoden slapp nesten alle lus taket inne første avlesning (etter 30 minutter), mens de resterende dyr klarte å henge fast i opptil 2 døgn. Igjen måtte vi konkludere at med det relativt lave antall voksne dyr som vi hadde tilgjengelig for måling var vi ikke i stand til å skjelne mellom grupper for det var mer stokastisk enn systematisk variasjon. Vi har derfor ikke analysert videre på disse.

**Data analyse**: For kopepoditter ble posisjonen av alle dyr korrelert med saltholdighetsprofilen i kolonnen slik at hver posisjon ble oversatt til en saltholdighet (Generalized additive model; GAM; Figur 2). Bare kolonner med mer end 100 dyr, ble brukt. Siden alle kopepoditter i en kolonne utgjorde avkom fra en lakselus hun ga disse tall os en middelverdi for saltholdighet med en spredning rundt. Forskjeller ble beregnet mellom grupper av dyr med ulik behandling og et signifikansnivå på $p<0.05$. Forsøk utført i de nye kolonner ble inspisert, men ikke kjørt statistisk analyse, da resultatene ble vurdert som dårlige. For voksne lus ble overlevelse plottet som overlevelse per time (døgn).

**Modellering**: Hydrodynamisk modellering ble utført ved bruk av lakselusmodellen (Sandvik 2020). I oppsettet har vi testet ulike scenarioer for larve atferd og modellert effekter av dette i utbredelseskort. For standard oppsett har vi brukt følgende «handlingsregler» for larveatferd: En gradvis økende andel av larvene svømmer nedover når saltholdigheten er mellom 31 og 23 psu (alle svømmer nedover når saltholdigheten er under 23, ingen når det er saltere enn 31, nauplier og kopepoditter oppfører seg likt). Dette har vi sammenlignet med nye «handlingsregler» basert på resultatene i prosjektet: Nauplier; En gradvis økende andel av larvene svømmer nedover når saltholdigheten er mellom 28 og 24 psu og for kopepoditter; En gradvis økende andel av larvene svømmer nedover når saltholdigheten er mellom 20 og 14 psu.

### 3.1.2 - Gjennomføring av prosjektet

Prosjektaktiviteter ble initiert av en innsamling av lakselus fra laks som sto i åpne merder på

Havforskningsinstituttet sin stasjon på Austevoll. Voknse hunlus med eggstrenger ble transportert til Nordnes hvor egg ble holdt i separate inkubatorer for hver hun frem til larvene hadde utviklet seg til kopepoditter. Klekking ble overvåket for å sikre at alle kopepoditter hadde var nær toppen (+/- 1 dag) av deres infektive evne (Skern-Mauritzen mfl 2020) når de ble testet for deres saltholdighets toleranse. En liten andel av alle kopepoditt gruppene ble brukt til å smitte opp ny fisk.

Fisken ble holdt på vann med full saltholdighet, men ble ferskvannsbehandlet 3 ganger per generasjon. For hver generasjon ble hoer med eggstrenger samlet inn og deres saltholdighetstoleranse testet ved start, etter 1., 2.,3., og 5. generasjon. Andre og tredje generasjoner ble testet med de nye kolonner mens resten ble testet med de gamle kolonner.

Voksne hoer ble bare testet 3 ganger siden begge typer av undersøkelse viste seg å gi lite informative resultater. I overgangen fra 3. til 4. generasjon lakselus opplevde vi tekniske problemer i våtlaboratoriet som førte til at al fisken døde, men vi rakte å ta vare på lusen. Dette betyr at al lusen (både behandlet og ubehandlet) har gjennomgått en kort periode med lite oksygen og stresset fisk. Videreføring av lusen forløp uten ytterligere problemer. Forsøket ble avsluttet etter 5.generasjon.

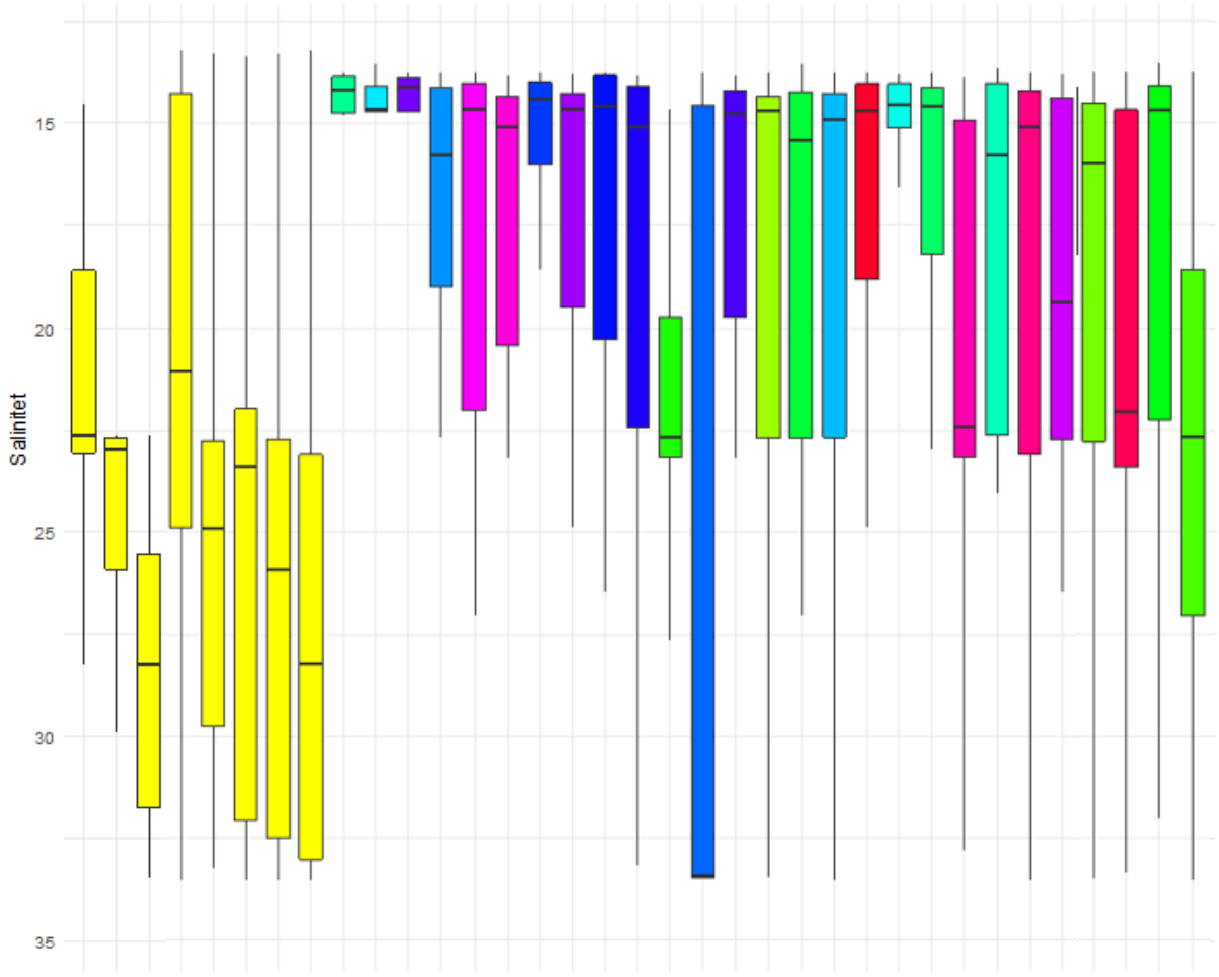
Hydrodynamisk modellering ble utført i etterkant av den eksperimentelle delen for å kunne bruke informasjon vi oppnådde der. Siden vi fant veldig små forskjeller mellom behandlet og ikke behandlet grupper av lakselus, har vi i stedet fokusert på å undersøke effekten av forskjellene mellom de verdier som brukes i den gjeldende lakselusmodell og de nye resultater vi har fått i Fersklus prosjektet fra nylig innsamlet lakselus. I prosjektet har vi bare undersøkt kopepoditter. Tidligere resultater som også er utført med nylig innsamlet lakselus. men i 2018, viste at nauplier i høy grad unngår al brakkvann mens kopepoditter i høyere grad går opp i brakkvann. Resultater fra Fersklus er altså ikke fundamentalt annerledes end tidligere forsøk, men antyder at kopepoditter i ennå større grad kan finnes i brakkvann. Vi kan heller ikke utelukke at lakseluspopulasjonen har endret seg siden 2018, en periode hvor behandlinger basert på ferskvann har vært i sterk vekst.

# 4 - Oppnådde resultater, diskusjon og konklusjon

Analyse av data fra prosjektet viser en rekke interessante funn angående brakkvannstoleranse i kopepoditter og konsekvensen for spredning. Brakkvannstoleransen ble bedømt utfra posisjonen og dermed saltholdigheten) i kolonnen som kopepoditter plasserte seg i når de ble tiltrukket av lys ovenfra.

**Resultat 1**: Brakkvannstoleransen er høy i nylig innsamlet lus

Lusene innsamlet i dette prosjektet ble ikke sammenlignet direkte med lakselus fra laboratoriet, men når vi sammenligner tallene fra forsøkene her med tidligere forsøk ser vi at nylig innsamlet lus var langt mer ferskvannstolerante end lus fra stammer vi har hatt i laboratoriet i mange generasjoner. Vi vet ikke hvorfor disse domestiserte lus er mindre tolerante, men den mest nærliggende årsak syns å være at disse alltid aldri utsettes for brakkvann, og alltid går på sjøvann (35 ppt).




*Figur 3. Saltholdighet som kopepoditter oppsøkte når tiltrukket av lys. Hver søyle viser spredningen av kopepoditter fra en hunlus (100+), de midterste 50% observasjoner i farge og medianen (horisontal strek). Gule søyler er lakselus fra en labstamme (LsOslo) og alle andre farger er nylig innsamlet lakselus*

Signifikans: Til tross for at lakselus vanligvis anses som en ren marin organisme, kan vi forvente at kopepoditter vil være til stede i øvre vannlag også når saltholdigheten er kraftig redusert. Videre undersøkelser må undersøke i hvilken grad disse også er i stand til å smitte fisk. Brakkvann som barriere mot smitte må anses som et tiltak der kanskje kan redusere, men ikke fjerne smitte. Dette har konsekvenser både i oppdrett og for villfisken.

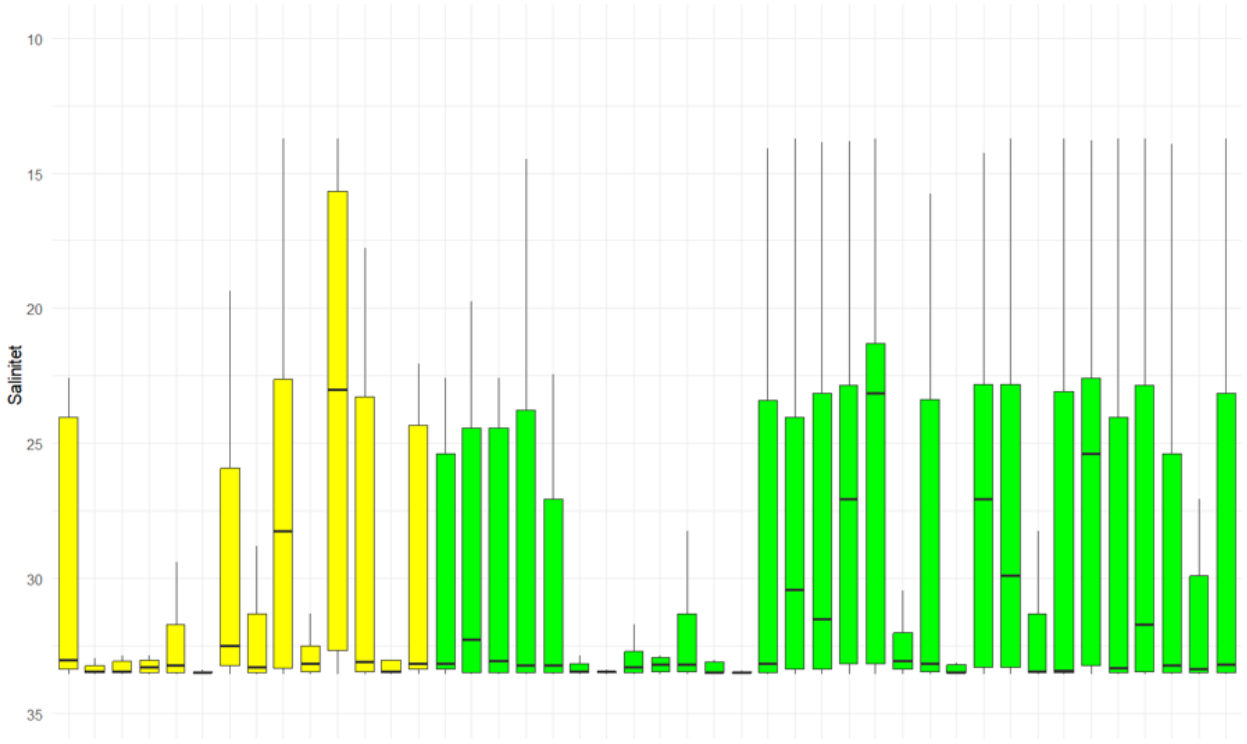
**Resultat 2**: Brakkvannstoleranse tapes fort ved opphold i full saltholdighet

Ved avslutning av forsøket da den nylig innsamlede lakselusen hadde vært i laboratoriet i 5 generasjoner tilsvarende x måneder var toleransen lik den vi fant i laboratoriestammen som hadde oppholdt seg i full salinitets sjøvann i 20 + generasjoner. Grunnet problemene med bruk av nye kolonner underveis vet vi ikke presis når denne reduksjonen i toleranse fant sted. Dette vil bli undersøkt i et nytt prosjekt «Fersklus 2»

Signifikans: Hvis kortere opphold med fullt sjøvann er nok til å miste toleranse overfor brakkvann, vil eventuelle tilpasninger som resultat av ferskvannsbehandlinger være mindre problematiske.

**Resultat 3**: Ferskvannsbehandling fører til en økt brakkvannstoleranse, men endringen er svært liten

Et av hodemålene med dette prosjektet var å finne ut om ferskvannsbehandlinger av oppdrettsfisk kunne føre til økt toleranse for brakkvann. Resultatene viser at ferskvannsbehandlinger får kopepoditter til å oppholde seg ved en signifikant lavere saltholdighet (P=0.042), men forskjellen mellom behandlet og ikke behandlet lavere er veldig liten med en gjennomsnittlig saltholdighet på 29.64 for ubehandlet versus 29.25 for behandlet (Figur 5). Resultatene viser samtidig også at effekten av behandlinger er nedarvet til neste generasjon. Forsøks grupper var i hele forsøket inndelt i en ubehandlet kontrollgruppe (kar7-9), og to behandlet grupper som var etterkommere av mødre med de mest (kar 1-3) og minst tolerante avkom (kar4-6). Ved avslutning av forsøket kunne vi ikke detektere noen forskjeller på de to behandlet grupper (kar1-3 versus 4-6).

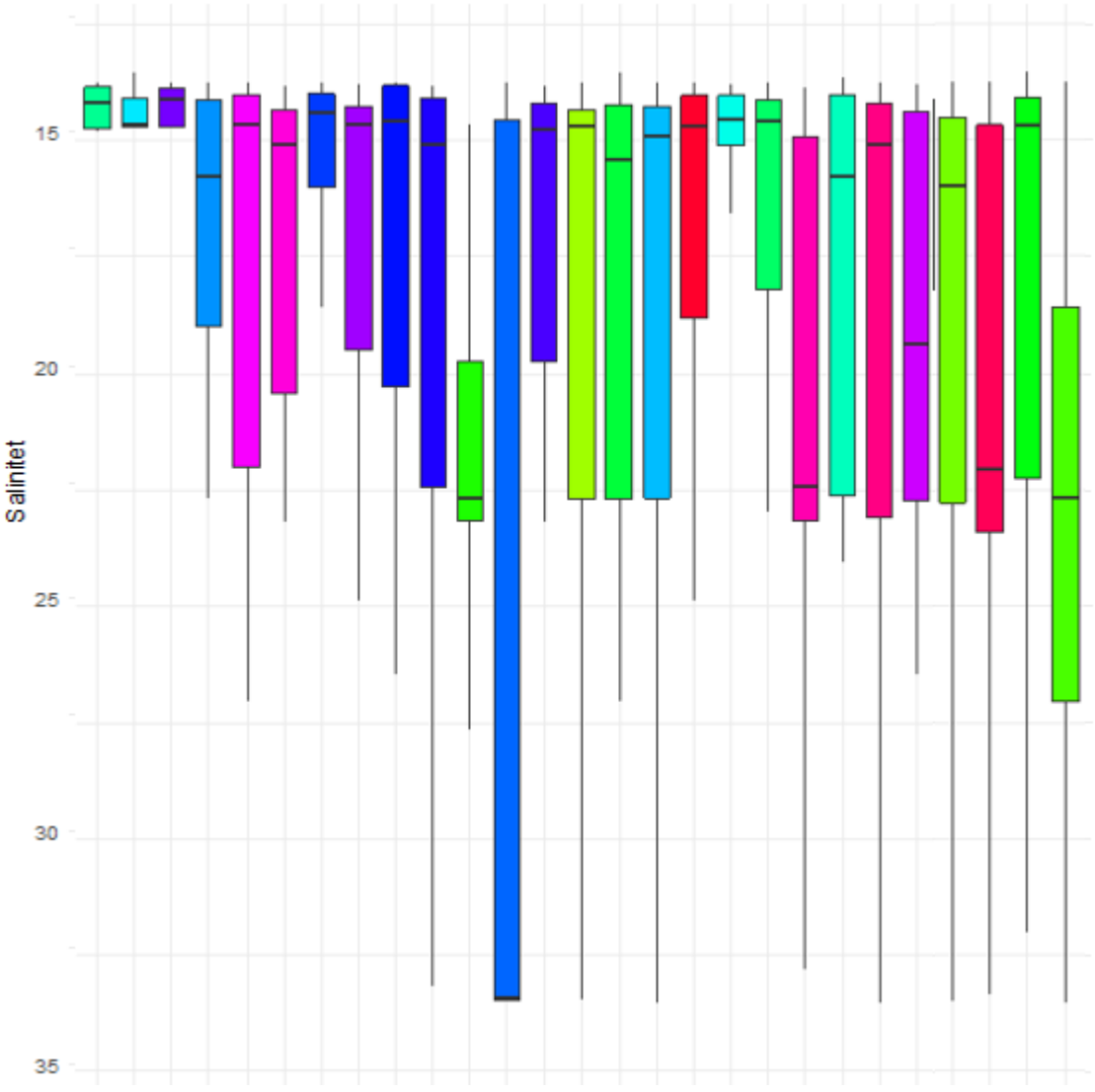



*Figur 4. Saltholdighet som kopepoditter oppsøkte når tiltrukket av lys etter 4 generasjoner med ferskvannsbehandlinger. Hver søyle viser spredningen av kopepoditter fra en hunlus (100+), de midterste 50% observasjoner i farge og medianen (horisontal strek). Gule søyler er ubehandlet lakselus og grønne er ferskvannsbehandlet.*

Signifikans: Utbredelsen av kopepoditter i brakkvannslag kan ikke forventes å endres i stor grad av ferskvannsbehandlinger som utført her. Dette betyr at brakkvannslag fremdeles kan forvente å yte beskyttelse av fisk som oppholder seg her siden vi forventer færre larver ved lave saltholdigheter. Her må det understrekes at disse resultater baserer seg på mye kortere ferskvannsbehandling end i en brønnbåtsbehandling og at det er tydelig at laboratorieoppholdet som lusene har vært igjennom for å bli ferskvannsbehandlet i gjentakende generasjoner har indusert svært store endringer i deres saltvannstoleranse i både behandlet og ikke behandlet dyr.

**Resultat 4**: Brakkvannstoleranse i nylig innsamlet lus utviser stor variasjon mellom avkom fra individer.

Den store individuelle variasjonen som i dette tilfelle er observert som forskjellen mellom søsken flokk med ulike mødre er ikke overraskende og gjenspeiler observasjoner av andre miljø preferanser til eksempel dybde og saltholdighet (Coates mfl. 2020, Ljungfeldt mfl 2017)

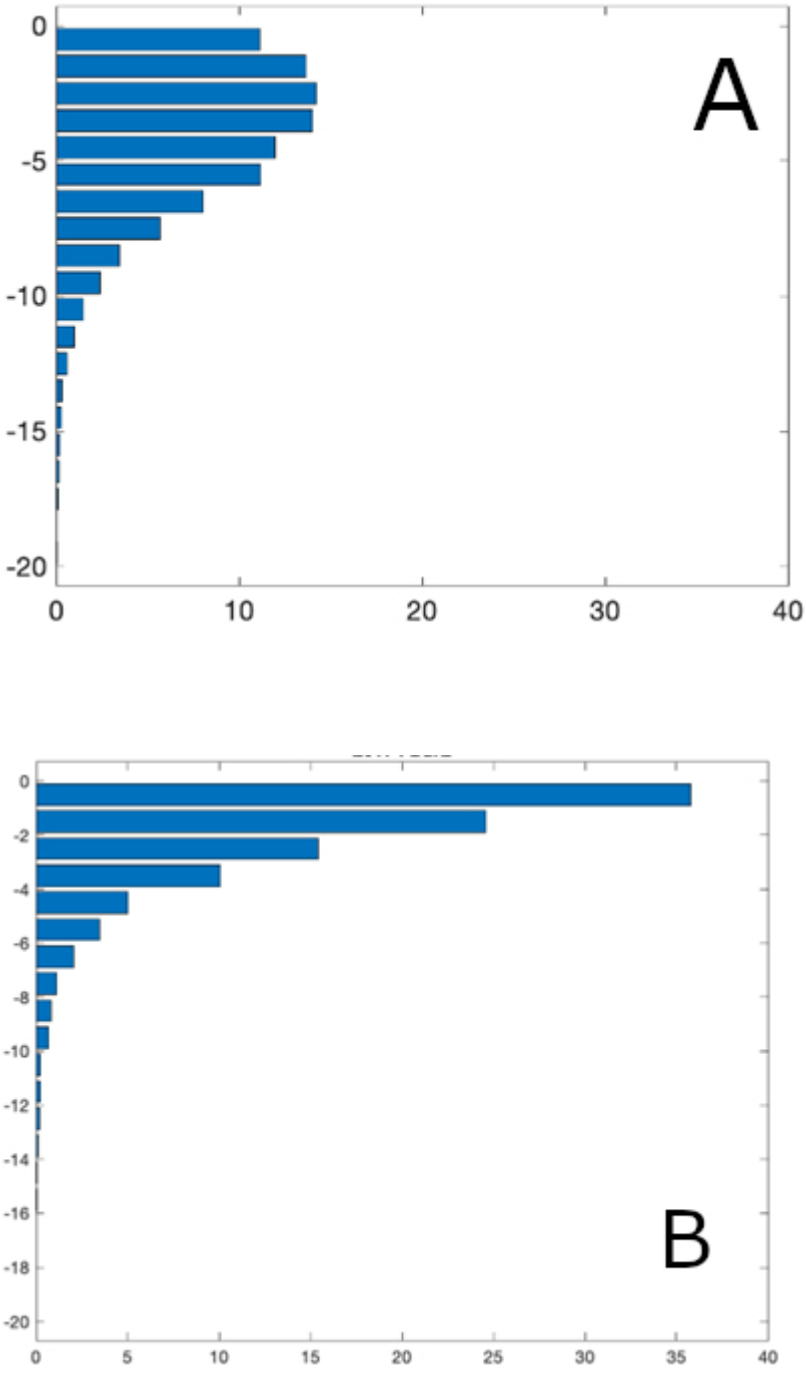



*Figur 3. Saltholdighet som nylig innsamlet kopepoditter oppsøkte når tiltrukket av lys. Hver søyle viser spredningen av kopepoditter fra en hunlus (100+), de midterste 50% observasjoner i farge og medianen (horisontal strek).*

Signifikans: Vi kan forvente store variasjon i egenskaper til lakselus innsamlet samtidig og på samme sted. Forsøksoppsett må ta høyde for dette. Dette har stor betydning for potensialet til lakselusen for å tilpasse seg nye oppdrettsformer og endringer i miljø, enten som en funksjon av det første eller grunnet klimaforandringer.

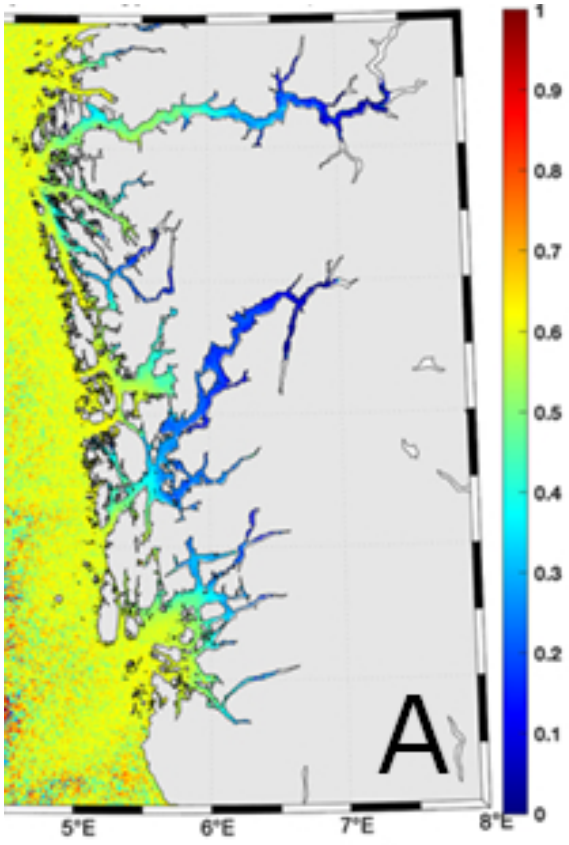
**Resultat 5:** Endringer i toleransegrenser fører til endret dybdefordeling og høyere smittepress i indre fjordstrøk

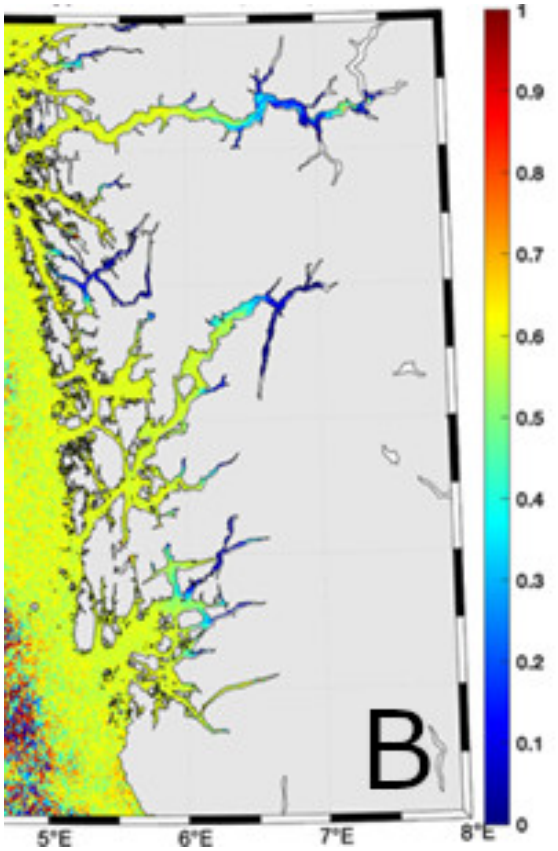
Modellering av lakseluslarver i områder med mye brakkvann viser at vi vil få langt flere larver i de øvre vannlag når vi bruker adferden vi har observert på nylig innsamlet lus i prosjektet




*Figur 6. Prosentvis fordeling av kopepoditter i dybden i perioden 15. mai til 15 juni (2017) på en ferskvannspåvirket lokalitet i indre Hardanger. (A) Etablerte grenser og (B) nye grenser.*

Som ses av figuren vil en langt større del av kopepodittene befinne seg øverst i vannsøylen tiltrukket av lys og i mindre grad frastøtt av lav saltholdighet. Denne fordelingen sammen med endret transport av larver siden ikke alle vannlag beveger seg i samme retning og med samme hastighet (Johnsen et al 2014) resulterer i endret fordelingen i fjorder og kystområder (Figur7).






*Figur 7. Romslig fordeling av kopepoditter i de 2 øverste meter i perioden 15. mai til 15 juni (2017). (A) Etablerte grenser og (B) nye grenser.*

Signifikans: Effekten av denne høyere toleranse i larver en økt forekomst av smittsomme lakseluslarver i de indre deler av fjordene. Dette er områder og sesong hvor ung og sårbar villfisk vandrer ut. Oppdrettsfisk vil i mindre grad oppholde seg så tett på overflaten.

**Andre resultater**:

Toleranse i voksne lus: 80-95% av de voksne lus utsatt for ferskvann (2 ppt) mister evnen til å sitte fast på siden av beholderen på mindre end 2 timer. De resterende lus mister evnen løpende i løpet av de første 4 døgn, men vi har ikke sett noen tydelige mønstre i tapet med hensyn til behandling og stammer. Dette kan til dels skylles at såpass få lus klarer å sitte fast utover 2 timer og at forskjeller av den grunn blir vanskelig å se, eller at denne prosessen ikke er påvirket av behandlinger. Vår konklusjon er at vi fremdeles ikke har en bra protokoll for å undersøke et bra assay som kan fortelle

Kolonnedesign: Kolonner er et viktig verktøy når vi skal undersøke adferd i lakseluslarver. Viten om larver sin respons overfor ulike miljøfaktorer har stor betydning for deres utbredelse i vannsøylen og dermed for hvordan de blir transportert i vannmassene og hvem de kan smitte. I prosjektet har vi utviklet et 2. generasjons design som ikke fungerte, men har bidratt til en tredje versjon som også inkluderer video overvåkning. Dette vil muliggjør mer effektiv og ikke bruker påvirket avlesning av fremtidige kolonner. Det vil også gi mulighet til å følge enkelt individer over tid som er viktig for optimalisering av kjøringer.

### 4.1.1 - Vurdering av funnene

Brakkvannstoleranse-larveadferd: I dette prosjektet ser vi at tilbøyeligheten til å oppsøke vann med lav saltholdighet er langt større blant nylig innsamlet lakselus end i laboratorie stammer. Sjøl om forsøkene i Fersklus er gjort på et relativt lite antall lus innsamlet i 1 lokalitet i 1 innsamling er dette noe som også er observert i andre prosjekter med andre innsamlinger og laboratoriestammer som vi og andre har utført (egne resultater under publisering, Krossøy 2024). Resultatet vurderes derfor å ha stor sikkerhet.

Vi forventer ikke at lakselus i andre områder (se introduksjon) vil ha betydelig annerledes egenskaper, men dette er et intuitivt spørsmål gitt de store forskjeller i geografi, ferskvannspåvirkning og sesong som finnes i norsk oppdrett og bør derfor adresseres med flere innsamlinger.

I prosjektet observerte vi endringer i larveatferd i avkom av ferskvannsbehandlet lakselus versus ubehandlet. Dette resultatet er statistisk signifikant, men indikerer svært små forskjeller. Det er vanskelig å vurdere om denne liten forskjell, rett og slett er liten, eller at det skylles andre forhold i oppsettet. Her er der en rekke faktorer som kan ha bidratt: a) ferskvannsbehandlinger var mye kortere end de som brukes kommersielt, b) det er svært usikkert hvordan og i hvilken grad stresset som lakselusen var utsatt for i slutten av 4. generasjon har påvirket resultater og c) adferden/toleransen i larver ble bare undersøkt med en metode og med samme saltholdigheter igjennom hele forsøket. Det er mulig at bruk av kolonner med kontinuerlige gradienter eller flere ulike høye saltholdigheter i 5. generasjon hadde gitt større forskjeller mellom gruppene.

Brakkvannstoleranse-adferd i voksne lakselus: Til tross for fler ulike forsøksoppsett mislykkedes vi med å utvikle en tilfredsstillende metodikk til å studere dette. Videre forsøk i Fersklus2 vil adressere problemstillingen.

### 4.1.2 - Vurdering av mulighetene for anvendelse av resultater fra prosjektet i næringen og bidrag til styrket bærekraft

Prosjektet har undersøkt effekten på de neste generasjoner av lakselus etter ferskvannsbehandling. Slike behandlinger er effektive, særlig når de kombineres med termiske eller mekaniske metoder, og de er derfor mye brukt i oppdrettsnæringen. Ferskvannsbehandling regnes i utgangspunktet som en miljøvennlig metode med god fiskevelferdsprofil, og det er derfor av stor betydning å dokumentere eventuelle negative konsekvenser av behandlingen som del av arbeidet med å utvikle en bærekraftig havbruksnæring. Som ved alle behandlingsformer vil imidlertid en mindre andel av lakselusen kunne overleve, og dette har gitt opphav til bekymring for at overlevende individer kan bidra til utvikling av en lakseluspopulasjon med økt toleranse for brakkvann. Grunnet de veldig små endringer vi så i ferskvannsbehandlet lakselus sammenlignet med ubehandlet lakselus underbygger resultatene i prosjektet ikke en bekymring for store effekter av ferskvannsbehandling på lakseluslarvers tilstedeværelse og smittepotensialet i brakkvannsområder.

# 5 - Hovedfunn

- Resultatene i disse forsøkene og tidligere studier viser at lakselusens evne til å tåle brakkvann er arvelig og dynamisk. Toleransen kan endres over få generasjoner og kan være epigenetisk styrt. Toleransen er derfor ikke nødvendigvis genetisk betinget.
- Ferskvannsbehandlet lakselus produserte avkom som tålte brakkvann bedre enn avkom fra ubehandlet lus, men forskjellen etter fire generasjoner var meget liten (ca. 1 promille).
- Forsøkene utført i prosjektet viste også at nylig innsamlet lakselus med relativt høy naturlig toleranse for brakkvann reduserte denne toleransen når de over tid ble holdt på full sjøvannssalinitet.

# 6 - Referanser

Andrews og Horsberg 2020: Sensitivity towards low salinity determined by bioassay in the salmon louse, Lepeophtheirus salmonis (Copepoda: Caligidae)

Coates mfl. 2020: Parasites under pressure: salmon lice have the capacity to adapt to depth-based preventions in aquaculture

Crosbie mfl. 2019: Effects of step salinity gradients on salmon lice larvae behaviour and dispersal.

Glover mfl. 2011: Population genetic structure of the parasitic copepod Lepeophtheirus salmonis throughout the Atlantic

Hahnenkamp og Fyhn 1985: The osmotic response of salmon louse, Lepeophtheirus salmonis (Copepoda: Caligidae), during the transition from sea water to fresh water.

Helgesen mfl. 2022: The surveillance programme for resistance in salmon lice (Lepeophtheirus salmonis) in Norway 2021

Johnsen mfl. 2014: Vertical salmon lice behavior as a response to environmental conditions and its influence on regional dispersion in a fjord system.

KrossÃ¸y 2024: Brakkvannstoleranse hos ulike stammer av lakselus (Lepeophtheirus salmonis). Masteroppgave i fiskehelse, Universitetet i Bergen

Ljungfeldt mfl. 2017: A pedigree-based experiment reveals variation in salinity and thermal tolerance in the salmon louse, Lepeophtheirus salmonis.

Sandvik mfl. 2020: Prediction of the salmon lice infestation pressure in a Norwegian fjord

Skern-Mauritzen mfl. 2020: Parasite development affect dispersal dynamics; infectivity, activity and energetic status in cohorts of salmon louse copepodids

# 7 - Leveranser

Oversikt over leveranser i prosjektet og oppnåelse av disse.

Leveranse 1.1 og 1.2; leveranse av voksne lakselus og kopepoditter til forsøkene: Oppnådd

Leveranse 2.1; Beskrivelse av saltholdighets toleranse i voksne lakselus: Avsluttet grunnet at den valgte metodikken og en ny metode ikke leverte informative resultater

Leveranse 2.2 Beskrivelse av saltholdighets toleranse i kopepoditter: Oppnådd

Leveranse 3.1 Modellering av endret saltholdighet toleranse i kopepoditter: Kommer til å inngå i leveranse 4.4

Leveranse 4.1 og 4.2 Statusrapporter, referansegruppemøter og møteoppsummeringer hver 6. måned: Oppnådd

Leveranse: 4.3 og 4.4: Resultater fra prosjektet er blitt presentert på 15th *International Conference on Copepoda* i Kyoto juni 2024, på *Havbruk* i Tromsø, oktober 2024 og på *Sealice 2025* i desember 2025

Leveranse 4.3. Der ble avholdt webinar med 120 deltakere i november 2025

Leveranse 4.4 Et vitenskapelig manuskript er under utarbeidelse

Leveranse 4.5 Populærvitenskapelig artikkel i Norsk fiskeoppdrett Nr.11 2025

Leveranse 4.6 og 4.7 Faglig og administrativ sluttrapport: oppnådd (ibid)

**HAVFORSKNINGSINSTITUTTET**

Postboks 1870 Nordnes
5817 Bergen
Tlf: 55 23 85 00
E-post: post@hi.no
www.hi.no