

## Gassovermetning i oppdrettsnæringen, del 1

# Hva betyr totalgasstrykk, trykkfall og når er det fare for bobledannelse

Gassovermettet vann kan oppstå i mange oppdrettssituasjoner og påvirke fiskens velferd og helse. Overmetning av gasser i vann kan skyldes pumping av vann, temperaturvariasjoner, trykkfall, gasstilførsel (f.eks.  $O_2$ ) og biologisk aktivitet. Det er en del usikkerhet og forvirring knyttet til måling av gasser i vann og begrepene som benyttes når en diskuterer overmetning. Dette kan igjen føre til usikkerhet om i hvilken grad vannet er gassovermettet og hvordan dette påvirker fisken. I denne artikkelen vil vi diskutere løselighet av gasser, hvordan man kan måle om vannet er overmettet, hvordan pumping og trykkendringer påvirker overmetning og hvordan bobler dannes. Del 2 vil omhandle hvordan gassovermettet vann kan påvirke fisk og vil publiseres senere.

Ole-Kristian Hess-Erga, Torolf Storsul, Ivar Rønnestad, Kåre Segadal, Alf Dalum, Silje Stensby-Skjærvik, Hedda Wahl-Ovesen, Sara Calabrese, Alf Reidar Sandstad, Linda Andersen, Mari Susanne Solerød og Reidar Handegård

Ole-Kristian.Hess-Erga@niva.no

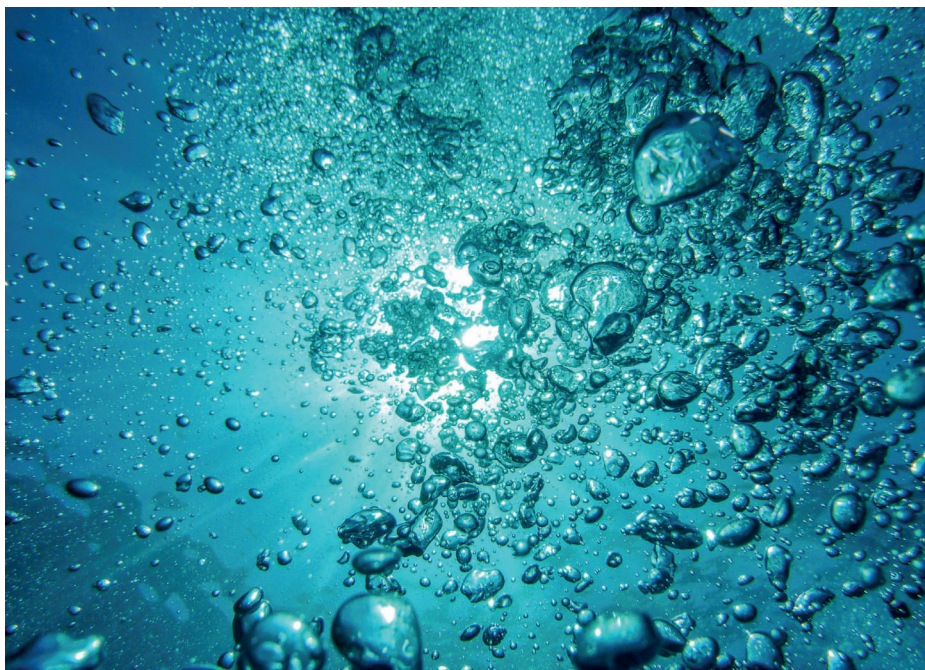
## Gassers egenskaper og måling av gasstrykk i vann

Forskjellige gasser har ulik løselighet i vann, avhengig av gassens egenskap, vannets innhold av salter, temperatur og gasstrykk/partialtrykket. Alle gassers løselighet avtar når temperatur og saltholdighet øker. Dette innebærer bl.a. at  $O_2$  har lavere løselighet i vann med høyere temperatur og økt saltinnhold, noe alle som steller med fisk har et forhold til.

Hvis man inkluderer de øvrige gassene som finnes løst i vannet og hvordan omgivelsestrykket påvirker innholdet av gasser i vann, blir det mer komplisert.

Summen av trykket av alle disse gassene (partial-/deltrykkene) utgjør det totale gasstrykket (Total Gas Pressure – TGP) i vannet. Hvis dette trykket relateres til barometertrykket ved vannoverflaten (atmosfærisk trykk), får man det som kalles totalgassmetning og oppgis som TGP % (= (totalt gasstrykk i vann/barometertrykk ved vannoverflaten) x 100). Det er viktig å presisere at TGP inkluderer deltrykket av alle løste gasser i vannet, uavhengig av løselighet (f.eks. har  $CO_2$  mye høyere løselighet enn  $O_2$ ) og gasstype.

Totalgassmåleres funksjon kan misforstås, men er egentlig ganske enkel. En totalgassmåler har to trykksensorer, én



Bobledannelse er komplisert, og det kreves en mikroskopisk kjerne (irregularitet) for at det skal skje. Men når det først er dannet bobler i vannet, vil boblene øke i størrelse, søke sammen og danne større bobler. Illustrasjonsfoto: MartinStr/Pixabay

i sensorhodet som senkes ned i vannet og én i avlesningsenheten/instrumentet som registrerer barometertrykket. Trykket angis ofte som mmHg (millimeter kvikksølv). Av praktiske hensyn kalibreres/justeres trykksensoren i sensorhodet mot instrumentets trykksensor.

Hundre prosent TGP betyr at det totale gasstrykket i vannet er likt det totale gasstrykket like over vannspeilet. Under slike forhold vil det ikke dannes gassbobler i vannet. Det er først når totalgassmetningen blir høyere enn 100 %, man må være på vakt. I slike tilfeller er det løst mer gasser i vannet enn vannet klarer å holde på.

Totalgassmålerne er dessverre ganske trege og bruker 10-15 minutter før det oppnås stabile verdier. I tillegg må sensorhodet tørke ut med jevne mellomrom, for å unngå feilmålinger på grunn av vanddamp på innsiden av membranen. Selv om måleprinsippet er likt mellom de ulike totalgassmålerne, finnes det ulike modeller (med og uten O<sub>2</sub>-, CO<sub>2</sub>- og temperatursensor) og måter å beregne verdier for rest- og N<sub>2</sub>-gass.

Kombinasjonsmålere kan i verste tilfelle bidra til unøyaktighet og feiltolkning, så bruken av slike målere bør vurderes nøye. En av de største feiltolkningene er at restgass/N<sub>2</sub>-gass benyttes som grensesettende parameter for fiske-relaterte operasjoner. Det er TGP (%) som sier noe om eventuell overmetning og risiko for bobledannelse.

## Bobledannelse i vann

Det er altså det samlede trykket av alle gasser som bestemmer det totale gasstrykket, enten det er i luft eller i vann. Etter hvert vil det oppstå likevekt mellom totalt gasstrykk i vann- og i luften over vannet.

Tiden det tar før en slik likevekt innstiller seg avhenger blant annet av vannets bevegelse og arealet på flaten mellom væskefasen og gassfasen.

Dersom samlet trykk av alle gasser i vann blir større enn samlet trykk av alle gasser i luft (> 100 % TGP), får vi gassovermettet vann og muligheter for bobledannelse i vannet. Det er det samme som skjer

## NYBRØK

Teksten er basert på arbeidet med prosjektet; Ny brønnbåtkunnskap - biologisk risikofaktorer ved bruk av brønnbåt til transport og behandling av laks (NYBRØK), finansiert av Fiskeri- og havbruksnæringens forskningsfinansiering (FHF), med partnerne NIVA, Aqua Kompetanse, UiB, NUI, ILAB, Patogen, Akvaplan-niva og Seafarming Systems.

## Trykk

Trykk defineres som kraft delt på areal, eller mer presist som forholdet mellom kraft som virker vinkelrett inn mot en flate og arealet av flaten.

Trykk kan oppgis i ulike enheter:

- Standard atmosfære (atm), som relateres til klodens gjennomsnittlige atmosfæriske trykk ved havnivå. Dette brukes ofte som referansetrykk og man kan uttrykke lavere (undertrykk) eller høyere (overtrykk) enn atmosfærisk trykk
- SI-enheten Pascal (Pa), oppgis ofte i kilopascal (kPa) 1 atm tilsvarer 101,325 kPa.
- Torr, eller millimeter kvikksølv (mmHg), 760 mmHg tilsvarer 1 atm
- Bar, 1 bar er det samme som 100 kPa
- Absolutt trykk eller atm absolutt (ata) bruker vakuum som referanse, 1 ata er 1 atm, mens for eksempel 0,8 ata er 0,2 atm lavere trykk enn 1 atm
- Omregning: 1 ata = 1 atm = 101325 Pa = 101,325 kPa = 1,01325 bar = 760 mmHg

## Deltrykk

Deltrykk (partialtrykk) er det trykket som en enkelt gass i en gassblanding ville hatt om den alene fylte det tilgjengelige rommet. For eksempel består tørr luft av ca. 21 % O<sub>2</sub> og ca. 78 % N<sub>2</sub> (+ en del gasser i mindre mengder). Det vil si at ved 1 atm er deltrykket til O<sub>2</sub> 0,21 atm og N<sub>2</sub> 0,78 atm. Siden luft også inneholder vanddamp (i gassfase), må man også ta hensyn til denne gassen, samt at mengde vanddamp i luft øker med økende temperatur.

Ved 5°C og barometertrykk på 760 mmHg, utgjør O<sub>2</sub> 157,8 mmHg, mens ved 15°C og samme barometertrykk, utgjør O<sub>2</sub> 156,5 mmHg.

Løseligheten er forskjellig for gassene og avhenger bl.a. av vannets saltholdighet.

Den løste mengden O<sub>2</sub> i ferskvann og saltvann ved f.eks. 5°C er henholdsvis 12,8 og 10,2 mg/l, mens den ved 15°C er 10,1 og 8,2 mg/l. Gitt at det er likevekt mellom alle gassene over og løst i vannet (viktig) vil alle betingelsene nevnt over ha et TGP på 100 % i overflaten selv om den løste mengde gass er ulik.

når en varmer opp vann og observerer bobler som gjerne fester seg til bunnen og siden av kjelen. Det er imidlertid viktig å presisere at det ikke vil kunne dannes bobler i vannet når TGP er mindre enn 100 %, selv om en enkelt gass er overmettet (for eksempel N<sub>2</sub>-gass). Derfor skal man alltid benytte TGP (%) og ikke restgass eller N<sub>2</sub> (%), når effekten på fisk skal vurderes. Andel restgasser har kun en verdi når man skal risikovurdere TGP (%) ved heving av O<sub>2</sub>-metningen.

Selve bobledannelsen er komplisert, og det kreves en mikroskopisk kjerne (irregularitet) for at gassbobler etableres. Men når det først er dannet bobler i vannet, vil boblene øke i størrelse, søke sammen og danne større bobler. Siden

overflatespenning i sjøvann er større, danner det seg finere bobler der enn i ferskvann. Siden boblene i saltvann er så små, vil de være vanskeligere å fjerne. Dette er det viktig å merke seg ved utlufting ved gjennombobling for å redusere enkeltgasser som fritt CO<sub>2</sub> eller N<sub>2</sub>, samt for å redusere gassovermetning.

### Effekt av endret omgivelsestrykk

Trykk er en faktor som betyr mye for gassmetningen. Det er imidlertid viktig å skille mellom gass- eller barometertrykket over vannspeilet, og det hydrostatiske trykket som oppstår på grunn av vannsøylen over målepunktet. Vekten av vannsøylen (hydrostatisk trykk) øker med 1 ata per 10 meter vannsøyle. Tilsvarende bestemmes lufttrykket av luftsøylens vekt, noe som gir lavere lufttrykk på fjelltopper og dermed lavere løselighet av gasser i fjellvann, enn ved havoverflaten.

Et økt hydrostatisk trykk gjør at vannet kan holde på mer gass, siden

totalgasstrykket i vannet må være høyere enn omgivelsestrykket for at bobler skal dannes. Dette er bakgrunnen for at man opererer med uttrykket «kompensasjonsdyp», som vil si at det hydrostatiske trykket er likt eller svakt høyere enn TGP. Dette innebærer at det er en fordel at fisken kan søke ned på større dyp for å unngå bobledannelse.

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 lossing vil økt trykk i systemene øke mengden av løste gasser i vannet (og i fisken). Men når lossingen er avsluttet og trykket reduseres igjen, kan det oppstå fare for gassovermetning. Dette er altså aktuelt etter at fisken er flyttet eller pumpet. Ved operasjoner som gir redusert barometertrykk (som ved lasting med sug eller undertrykk), vil det bli fare for umiddelbar gassovermetning i vannet. Dersom vannet er gassovermettet ved overflaten, kan fisken unngå dette ved å svømme dypere ned i vannsøylen.

Og her kommer vi til et meget viktig poeng når det gjelder måling av TGP (%) ved hjelp av totalgassmålere. Som nevnt, kalibreres/justeres trykkmåleren i sensorhodet opp mot trykkmåleren i avlesingsenheten/instrumentet. Men, dersom totalgassmåleren benyttes til å måle TGP (%) i et rom med annet trykk enn trykket der avlesingsenheten befinner seg, vil disse målingene kunne bli misvisende.

Måling av TGP (%) i situasjoner med endret omgivelsestrykk vil vise feil TGP (%), hvis ikke instrumentet også befinner seg ved det endrede omgivelsestrykket. Ved redusert omgivelsestrykk vil derfor TGP (%) underestimeres betydelig.

Tilsvarende vil TGP (%) kunne overestimeres ved overtrykk. For å få riktige verdier, må trykkregistreringene i instrumentet erstattes med det aktuelle omgivelsestrykket og gassmetningen beregnes på nytt •



Forsøkene ble utført i kammeret, Obelix, med dybdekapasitet i overflod. Foto: Jonas Giæver/NIVA

# Laks utviklet trykkfallsyke under simulert lastning

Det FHF-finansierte prosjektet NYBRØK har nylig gjennomført kontrollerte fiskeforsøk i trykkammer.

Funnene viser at laks kan få trykkfallsyke ved 0,4 ata, men at dette kan unngås ved å begrense holdetiden.

Ole-Kristian Hess-Erga, Torolf Storsul, Ivar Rønnestad, Kåre Segadal, Alf Dalum, Silje Stensby-Skjærvik, Hedda Wahl-Ovesen, Sara Calabrese, Alf Reidar Sandstad, Linda Andersen, Kim Løseth, Susanne Håvardstun Eide, Markus Valle Sjøstrand, Hasan Abdulrahman Abdo, Anders Tenden Myklebust, Gerard De Waal Mari Susanne Solerød og Reidar Handegård

Ole-Kristian.Hess-Erga@niva.no

NYBRØK-prosjektet har gjennomført kontrollerte fiskeforsøk i trykkammer. Forsøkene har simulert trykkforhold og varighet i ytterkant av det som benyttes i brønnbåter.

Bakgrunnen for undersøkelsene er enkelthendelser ved lastning og lossing av brønnbåt, hvor man har sett redusert fiskevelferd og fiskedød, og mistenker at årsaken er trykkfallsyke.

I forsøkene er det undersøkt hva som frambringer trykkfallsyke («gassboblesyke»/«dykkesyke») hos atlantisk laks og hvilke typiske adferdsendringer som følger av dette.

Observasjon av spesifikke adferdsendringer gjør det mulig å iverksette avbøtende tiltak som hindrer at fisken

får trykkfallsyke. Endret adferd og gassbobler i gattfinne kan oppdages med videokamera og brukes som en indikator på trykkfallsyke.

## Simulert lastning og lossing

Forsøkene simulerte trykkforhold og varighet (tid fra første til siste fisk er lastet/losset) i øvre område av det som benyttes i brønnbåter, hvor fisk og vann suges om bord (lastning) og trykkes ut igjen (lossing).

I forsøkene ble sjøvann med 12 fisk om gangen enten dekomprimert (fra høyere til lavere omgivelsestrykk - lastning) eller komprimert (fra lavere til høyere omgivelsestrykk - lossing) i løpet av få sekunder og holdt ved det aktuelle omgivelsestrykket i maksimalt 150 minutter.

## Begrep brukt i teksten

- Dykkesyke er en folkelig betegnelse på én type dekompresjonssyke, som igjen er type gassboblesykdom.
- Gassboblesyke (GBS), er et miljømessig eller fysisk induisert traume. Det er forårsaket av at det oppløste gasstrykket overstiger det omgivende trykket (overmetning), slik at det dannes gassbobler som fører til skader inne i fisken.
- Dekompresjonssyke oppstår når trykkreduksjon forårsaker at tidligere oppløst gass danner bobler i vev, blod eller andre kroppsvæsker og gir symptomer.
- Dekomprimering er i denne sammenhengen synonymt med å ta fisk i vann fra høyere til lavere omgivelsestrykk. Ved undertrykkslasting til brønnbåt vil dette skje når fisk og vann suges om bord.
- Komprimering er i denne sammenhengen synonymt med å påføre fisk og vann et høyere omgivelsestrykk. Målet er å «skyve» fisken ut av båten, noe som tilsvarer lossing.
- Absolutt trykk eller atm absolutt (ata) bruker vakuum som referanse, 1 ata er 1 atm, mens for eksempel 0,8 ata er 0,2 atm lavere trykk enn 1 atm
- Omregning: 1 ata = 1 atm = 101325 Pa = 101,325 kPa = 1,01325 bar = 760 mmHg.



Folkene bak trykkforsøkene på NUI: Fra venstre: Silje Stensby-Skjærvik (AK), Hedda Wahl-Ovesen (master UiB/AK), Torolf Storsul (AK), Ole-Kristian Hess-Erga (NIVA), Hasan Abdulrahman Abdo (NUI), Anders Tenden Myklebust (NUI), Gerard De Waal (NUI), Kim Løseth (NUI), Linda Andersen (Ilab), Ivar Rønnestad (UiB), Susanne Håvardstun Eide (Ilab), Alf Dalum (Patogen), Markus Valle Sjøstrand (Ilab), Sara Calabrese (NIVA), Kåre Segadal (NUI) og Obelix (NUI). Foto: Fredrik Bærheim (NUI).

## Vitenskapet

### Dette er NYBRØK-prosjektet

NYBRØK-prosjektet – Ny brønnbåtkunnskap - biologiske risikofaktorer ved bruk av brønnbåt til transport og behandling av laks – har partnere fra NIVA, NUI, UiB, Aqua Kompetanse, Patogen, Seafarming Systems, Akvaplan-niva og ILAB. Prosjektet startet i 2022 og er finansiert av Fiskeri og havbruksnæringens Forskningsfinansiering (FHF). Les mer om prosjektet i FHF's prosjektbase: <https://www.fhf.no/prosjekter/prosjektbasen/901788/>

Den simulerte lasteprosessen innebar dekomprimering av fisk fra normalt overflatetrykk (1 ata) til et lavere trykk; 0,4 ata (tilsvarende 6 meters «sugehøyde» eller atmosfæretrykket ved ca. 7000 meters høyde) og den simulerte losseprosessen innebar komprimering fra normalt overflatetrykk (1 ata) til et høyere trykk; 2,6 ata (tilsvarende 16 meters vanddybde) i trykkammer.

Etter å ha holdt omgivelsestrykket på 0,4 ata eller 2,6 ata i varierende tid, ble fiskene returnert tilbake til normalt omgivelsestrykk. Deretter ble fisken undersøkt for å finne mulige effekter av eksponeringen.

Fiskene ble nøye observert med video under hele forsøket for å karakterisere atferdsendringer, spesielt med tanke på tidlige indikasjoner på trykkfallsyke.

### Visse betingelser gir laks trykkfallsyke

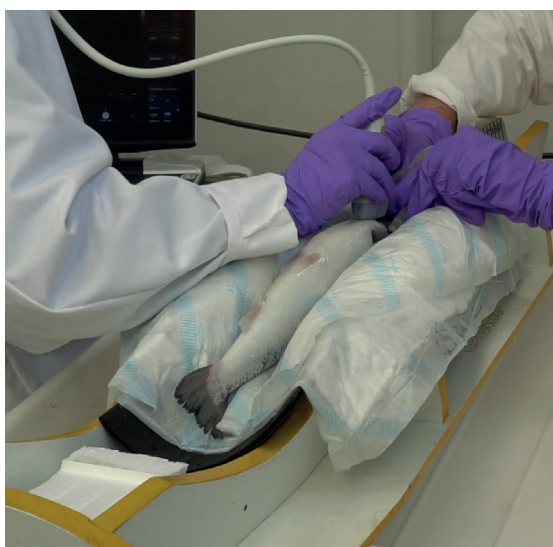
Rett etter dekomprimering til 0,4 ata slapp fisken ut gass fra svømmeblæren og søkte nedover i vannsøylen. Mot slutten av holdetiden endret fisken adferd. Ved komprimering til 2,6 ata søkte fisken derimot først oppover i vannsøylen, og endret ikke adferd mot slutten av holdetiden.

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. Senere i forløpet så man fisk som fikk problemer med oppdriftslikevekten og fisk som ble liggende i sideleie på bunnen. Ultralydundersøkelser og visuelle observasjoner etter eksponering, påviste bobler i blodløpet og finner hos enkelte fisk.

Andelen fisk med avvikende adferd og bobler i blodløpet og i finnene, økte med eksponeringstiden (60 til 113 minutter). Omfattende bobledannelse var alltid assosiert med fiskedød. Dette viser at trykkfallsyke kan påføres laks ved et slikt omgivelsestrykk og varighet i simulerte lasteoperasjoner. Laks tåler tilsynelatende lossing (komprimering) under testede trykkforhold bedre, men



Skann QR-koden og se film fra forsøkene. Film: Jonas Giæver/NIVA



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

gjenstående analyser kan endre disse foreløpige observasjonene.

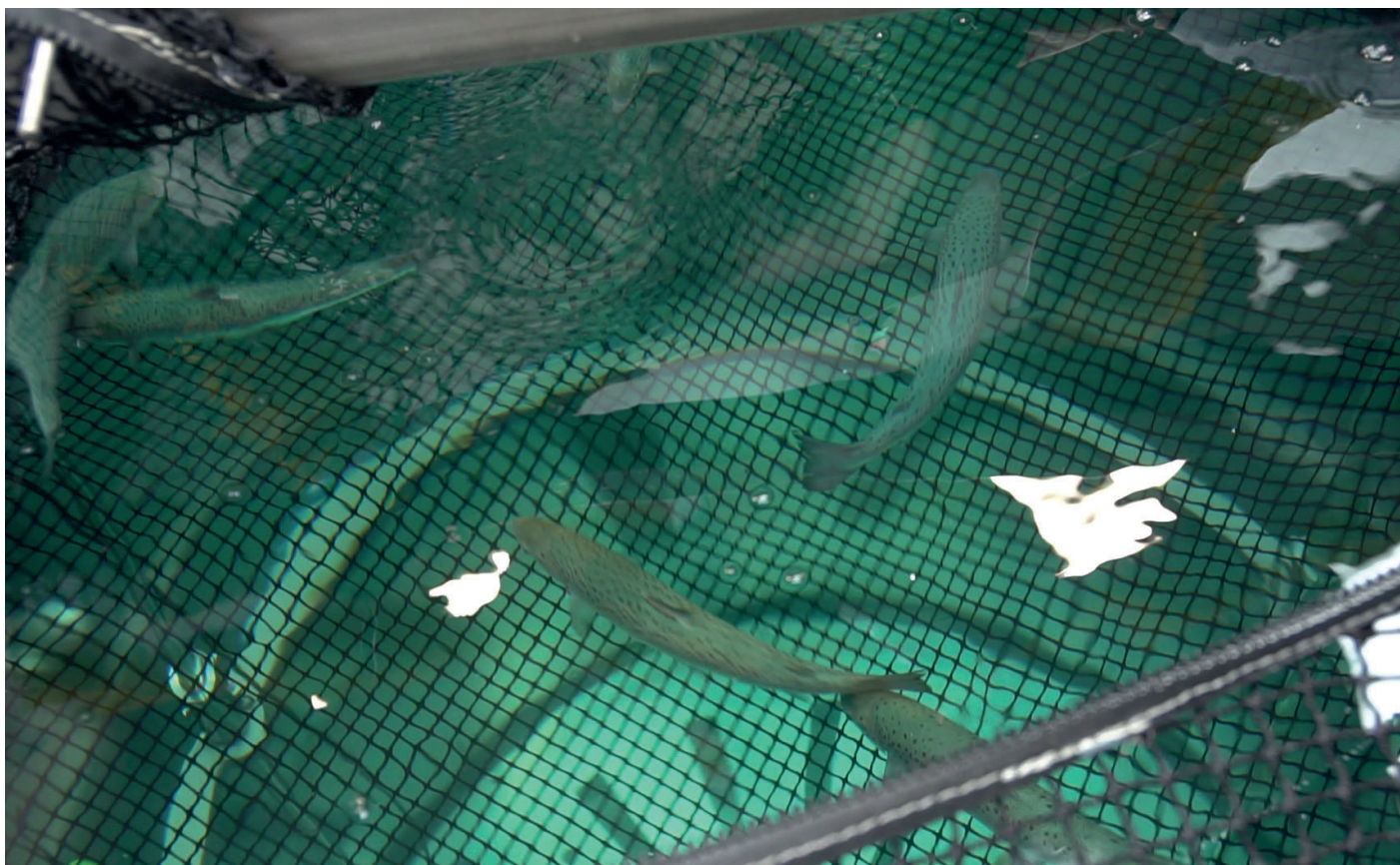
### Kort lastetid kan være positivt

Det gjenstår fortsatt en del tolking av resultatene, men mye tyder på at det kan være bra for fiskevelferden å begrense lastetiden til under en time ved trykkforhold rundt 0,4 ata. Ettersom forsøk under kontrollerte betingelser aldri vil være en nøyaktig gjengivelse eller representasjon av virkelige operasjoner, skal det senere i år også gjennomføres feltstudier i brønnbåter.

Endret adferd og gassbobler i gattfinne kan oppdages med videokamera i brønnen og er en mulig indikator på trykkfallsyke. En slik rask og enkel vurdering av gattfinne kan evt. bekreftes ved obduksjon av slik fisk i ettertid. Gassbobler i finner vil bli undersøkt og systematisert nærmere i en masteroppgave ved UiB og Aqua Kompetanse •



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



Noen av fiskene fikk trykkfallsyke, men man antar at det kan være bra for fiskevelferden å begrense lastetiden til brønnbåt til under en time ved trykkforhold rundt 0,4 ata. Foto: Jonas Giæver/NIVA