

Gassovermetning i oppdrettsnæringen, del 2:

Hvor stort trykkfall tåler fisken?

Torolf Storsul¹, Alf Seljenes Dalum^{1,2}, Silje Stensby-Skjærvik¹, Kåre Segadal³, Kim Løseth³, Linda Andersen⁴, Susanne Håvardstun Eide⁴, Reidar Handegård⁴, Hedda Wahl-Ovesen¹, Ole-Kristian Hess-Erga⁵, Sara Calabrese⁵, & Ivar Rønnestad⁶. For nummerforklaring, se faktaboks under.

Kontaktperson: Torolf Storsul, torolf@aqua-kompetanse.no

Dette er NYBRØK-prosjektet

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 NIVA⁵, Aqua Kompetanse¹, UiB⁶, NUI³, ILAB⁴, Patogen², Akvaplan-niva og Seafarming Systems

Teknologi og størrelse på brønnbåter i den norske oppdrettsnæringa har utviklet seg betydelig de siste 10–15 årene. Høydeforskjellen mellom havoverflaten og det høyeste punktet fisken flyttes over, er i en del tilfeller blitt større. Stor løftehøyde hvor man suger opp vann og fisk, forutsetter lavere trykk enn en lavere løftehøyde.

En reduksjon i trykk vil føre til økt totalgassovermetning, og ved trykkendringer er potensialet for betydelige og raske utslag i gassovermetning i vann og fisk til stede. For mer utførlige beskrivelser vises det til del 1 av artiklene om gassovermetning i oppdrettsnæringen (Norsk Fiskeoppdrett 10/2023).

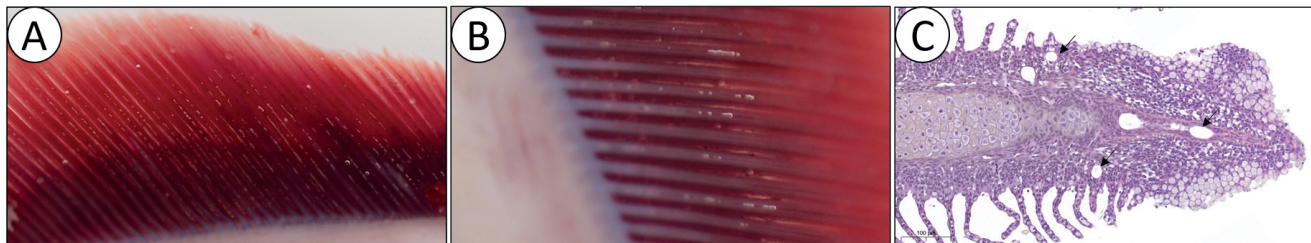
Totalgassovermetning er grunnlaget for at fisk kan utvikle gassboblesyke, hvor konsekvensene for fisken kan være alt fra subkliniske tilstander, til klinisk sykdom av ulik alvorlighetsgrad og i ytterste konsekvens død.

Diagnostikken ved gassboblesyke er utfordrende, og ulike mekanismer som fører til gassboblesyke kan gi ulike kliniske utslag. I FHF-prosjektet NYBRØK har vi studert om nye metoder kan gi mer presis diagnostikk av fisk, og hva som kan være egnede metoder for å diagnostisere gassboblesyke hos fisk.

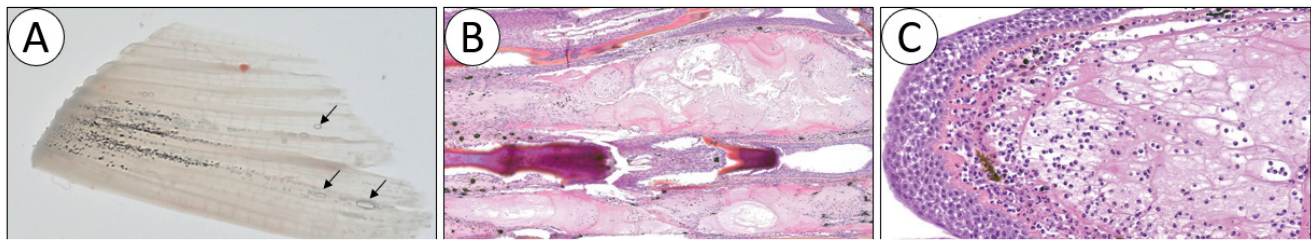
Grad av totalgassovermetning og tid er de to viktigste faktorene som påvirker risikoen for gassboblesyke. Dette kan brukes som utgangspunkt for hvordan man kan jobbe for å begrense problemet og hvilke tiltak som er aktuelle.

Hva kan gi gassovermetning?

I litteraturen er det beskrevet *ni mekanismer* som kan medføre gassovermetning (Colt, 1986, 2012). Ikke alle av disse er relevante i forbindelse med oppdrett eller i brønnbåtoperasjoner. Den første



Figur 1: 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.



Figur 2: 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).

mekanismen for gassovermetning er *temperaturøkning* av vann, hvor løseligheten av gasser avtar med økende temperatur. *Blanding av vann med ulik temperatur* kan også resultere i gassovermetning, det samme kan *blanding av vann med ulik salinitet*. Ved *isdannelse* vil løste gasser frigis fra den delen av vannet som omdannes til is og bli tatt opp i det gjenværende vannet. Denne mekanismen vil kunne medføre en overmetning dersom tilstrekkelig andel av vannet fryser, da is forhindrer gassutveksling med luften over vannspeilet. Den femte mekanismen beskrevet innebærer at vann ved høyere trykk kan holde mer løst gass, og senere bli overmettet dersom trykket reduseres. Dette er en kjent problemstilling fra blant annet produksjon av laks i settefiskanlegg, der innsug av falsk luft på sugesiden av en pumpe kan løses i vannet på trykksiden av pumpa og senere medføre gassovermetning av vannet i karene. *Fotosyntese* kan også medføre akkumulering av oksygen (O_2) i vannet i perioder med sterkt sollys, og forårsake gassovermetning av vannet. Dette skyldes at deltrykket av CO_2 som forbrukes er lavere enn deltrykket til O_2 som blir produsert.

Videre er *fysiologiske prosesser* beskrevet som mulige mekanismer for gassovermetning hos fisk. Choroid rete mirabile i øyet er en struktur som er med på å sikre tilstrekkelig oksygentilførsel til netthinnen, og medfører et høyere partialtrykk av O_2 i øyet sammenlignet med annet vev i fisken. En liknende mekanisme finnes for å produsere gass til svømmeblæren hos en rekke fiskearter. *Bakteriell aktivitet* kan også være en kilde til gassovermetning. Ved en reduksjon av trykk i *luftlommen over vannspeilet* vil vannets evne til å holde løste gasser reduseres. Dette er den mest aktuelle problemstillingen ved lasting av

fisk ombord i en brønnbåt. Denne formen for gassboblesyke forårsaket av reduksjon i trykk kan også kalles trykkfallssyke.

Bobledannelse i fisk ved reduksjon av trykk

Gassbobler kan dannes i vann og kroppsvæsker når det er totalgassovermetning.

En utbredt misforståelse er at det er nitrogenmetningen alene som er avgjørende. Det er ikke korrekt da det er fullt mulig å ha nitrogengassovermetning (>100 % N_2) samtidig med undermetning av

Terminologi

- **Gassboblesyke** (eng: gas bubble disease). NYBRØK-prosjektet foreslår at man bruker «gassboblesyke», ikke «gassblæresyke» som er et begrep som ellers benyttes og ikke er like treffende. Bakgrunnen for dette er forståelsen av at en blære er avgrenset av en biologisk membran, mens en boble er «en liten gassmengde som er omsluttet av væske» (snl.no/boble). Gassboblesyke er forårsaket av totalgassovermetning, og at det dannes gassbobler som kan føre til skader og sirkulatoriske problemer hos fisk.
- **Trykkfallssyke** eller **dekompresjonssyke** er en type gassboblesyke hvor det er et trykkfall som gir gassovermetning og dermed grunnlag for bobledannelse. Dette er vel kjent for dykkere, men forekommer også for astronauter og i luftfart, f.eks. ved plutselig feil på trykkabin.
- **Dykkersyke** er en type trykkfallssyke hos mennesker, hvor det dannes bobler hos dykkere i forbindelse med trykkfallet ved oppstigning. Begrepet er ikke relevant for fisk.
- **Trykkfallssyke hos laks** er mer sammenliknbart med tilstanden hos mennesker der man har **trykkfallssyke ved flyging og opphold i høyden**.
- **TGP** eller **Total Gas Pressure** er det totale gasstrykket av alle gasser i vann.
- **BP** eller **Barometric Pressure** er det barometriske trykket, altså lufttrykket over havflaten. For å regne ut totalgassmetningen i et rom hvor gasstrykket er modifisert, må man sette inn det aktuelle gasstrykket i formelen for totalgassmetning i stedet for BP.
- **ΔP** eller **differential gas pressure** er differensialtrykket, differansen mellom TGP og BP.
- **TGP(%)** eller **% total gas pressure** er totalgassmetningen, og finnes ved å sette inn verdier for BP og ΔP i følgende formel (Colt, 1983):

$$TGP(\%) = \left[\frac{BP + \Delta P}{BP} \right] 100$$

- **Hydrostatisk trykk** er trykk som er forårsaket av vekten av vannsøylen.

andre gasser i vannet, og at summen av de ulike deltrykkene (partialtrykkene) ikke gir en totalgassovermetning ($TGP(\%) < 100$). I en slik situasjon er det ikke grunnlag for bobledannelse.

Ved trykkreduksjon kan grunnlaget for bobledannelse ses i lys av Henrys lov: ved en gitt temperatur er mengden av en gass som kan løses i en væske proporsjonal med gassens trykk over væsken. Sagt på en annen måte, dersom man reduserer trykket i gasslommen over vannspeilet, vil vannet og kroppsvæsker kunne «holde på» mindre gass. Dersom man kommer over terskelen for totalgassovermetning vil det kunne dannes bobler. Bobler i vannet vil kunne stige opp til overflaten

og gassen frigis til gasslommen over, som en del av prosessen mot ny likevekt. Det er samme prinsipp som man ser når man åpner en brusflaske. Bobler som dannes i fiskens kroppsvæsker vil kunne «luftes ut» via gjellene til omgivende vann, men det er en langsom prosess og avhenger av gassmetningen i det omgivende vannet.

Med utgangspunkt i dette er det særlig to risikable situasjoner som kan oppstå under håndtering av fisk i brønnbåtsammenheng. Den ene oppstår ved lasting av fisk ved hjelp av lavt trykk («sug») hvor fisken i forkant har vært tilpasset normalt atmosfærisk trykk. Den andre oppstår når fisken utsettes for overtrykk med samtidig innblanding av gass (for eksempel oksygenering), og hvor fisken rekker å innstille seg mot likevekt med totalgasstrykket i det trykksatte vannet, før systemet returneres til normalt atmosfærisk trykk (som ved lossing fra brønnbåt) (Beyer et al., 1976).

Mulige konsekvenser av trykkfall for fisken

Vi vet lite om konsekvensene av trykk-eksponeringer i brønnbåtoperasjoner og gassboblesyke. Fisken kan utsettes for endret trykk ifra flere minutter til flere timer. Det finnes dog litteratur som omhandler trykkendringer når fisk passerer turbiner i vannkraftverk. Fisken utsettes da for trykkfall som typisk varer i millisekunder. Scenario hvor fisk og vann mettes med gass under høyt trykk, og gassovermetning oppstår når trykket normaliseres til atmosfærisk trykk, er også beskrevet i litteraturen. Det er også mye tilgjengelig litteratur rundt gassboblesyke ved gassovermetting ved normalt atmosfærisk trykk (Colt, 1986; Speare, 2010). Selv om mekanismene har enkelte ulikheter, vil effektene på fisken være relativt sammenliknbare.

Effekten på fisken vil først og fremst avhenge av graden av trykkreduksjon og tiden fisken eksponeres for det reduserte trykket. Skader forårsaket av gassbobler kan deles opp etter brått innsettende skader (akutte forandringer), og 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 når gassbobler fester seg til hjerte og hjerteklaffer, noe som kan medføre akutt hjertesvikt og død (Beyer et

Regneeksempel

Det er mulig å regne på ulike scenario, og i regneeksempelen under vises det som omtrent tilsvarende forholdene under eksponeringer i NYBRØK-prosjektet. Her ble trykket endret fra atmosfærisk trykk til ca. 0,6 bar lavere enn atmosfærisk trykk, og vi ser det ga en totalgassmetning på 250 % og et kompensasjonsdyp på ca. 6 meter. Tabellen viser også totalgassmetning hensyntatt hydrostatisk trykk for hver meter nedover i vannsøylen, med rød farge over kompensasjonsdypet og grønn farge under kompensasjonsdypet. Utregningen er foretatt ut fra en temperatur på 10 grader, salinitet på 33 ‰ og en totalgassmetning før trykkendring på 100 %.

Etter trykkendring

Input:

Trykk bar relativt til atmosfærisk trykk

Output:

Totalgassmetning	250,0	TGP (%)
Kompensasjonsdyp	5,97	m
Differensialtrykk	450,0	mmHg

Kompensasjonsdyp og gassmetning hensyntatt hydrostatisk trykk:

Dybde (m)	Hydrostatisk trykk (kPa)	Differensialtrykk minus hydrostatisk trykk (kPa)	Differensialtrykk minus hydrostatisk trykk (mmHg)	Totalgassmetning hensyntatt hydrostatisk trykk (%)
0	0,0	60,0	450,0	250,0
1	10,1	49,9	374,6	199,8
2	20,1	39,9	299,2	166,4
3	30,2	29,8	223,8	142,5
4	40,2	19,8	148,3	124,7
5	50,3	9,7	72,9	110,8
6	60,3	-0,3	-2,5	99,7
7	70,4	-10,4	-78,0	90,6
8	80,4	-20,4	-153,4	83,0
9	90,5	-30,5	-228,8	76,6
10	100,6	-40,6	-304,2	71,1

al., 1976). Det er også vist at bobledannelser i gjeller er nært korrelert med økt dødelighet (Pleizier et al., 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.

Diagnostikk

Diagnostikk av gassboblesyke krever tett oppfølging av fisken i risikoperioder. For fisk som overlever gassboblesyke, vil sirkulasjonssystemet etterstrebe å transportere overskudd av gasser ut av fisken etter at det skadelige trykkfallet er avsluttet. Skadene som etterlates i fisken er derfor ofte vanskelig å relatere til utløsende årsaksforhold. For fisk som dør vil vev gå i oppløsning og føre til at gassen raskt frigis ut av fisken. NYBRØK-prosjektet har vist overraskende lite samsvar mellom histologiske funn og observert klinikk, og ved akutt dødelighet dør fisken før vevsresponser rekker å utvikle seg. Det finnes så langt ingen kommersielt tilgjengelige molekylærbiologiske eller biokjemiske metoder for påvisning av skader som gassbobler kan forårsake inne i fisken. I NYBRØK-prosjektet ble måling av angiotensin converting enzyme (ACE) undersøkt da dette er en indikator på endotelskade ved dykkersyke hos mennesker. Funnene så langt er imidlertid ikke-konklusive. For sikker diagnose må det hos klinisk syk fisk kunne påvises gassbobler i vev, noe som krever nøye klinisk undersøkelse av fisken kort tid etter trykkreduksjon. Det kan være praktisk å skille mellom påvisning av gassbobler i hud og overflatisk vev, og påvisning av gassbobler i systemisk sirkulasjon.

Vurdering av forekomst av gassbobler i hud og overflatisk vev er praktisk og kan

gjennomføres makroskopisk med enkle verktøy; en god lyskilde og gjerne en lupe eller mikroskop kan lette vurderingen. Vev som er særlig viktige å vurdere er gjeller (se figur 1 A og B), finner (se figur 2 A), sidelinje og slimhinne inne i munn og ganetak (Speare, 2010). Det er ikke uvanlig å påvise sårskader dager til uker etter påvisning at bobler i hudoverflate.

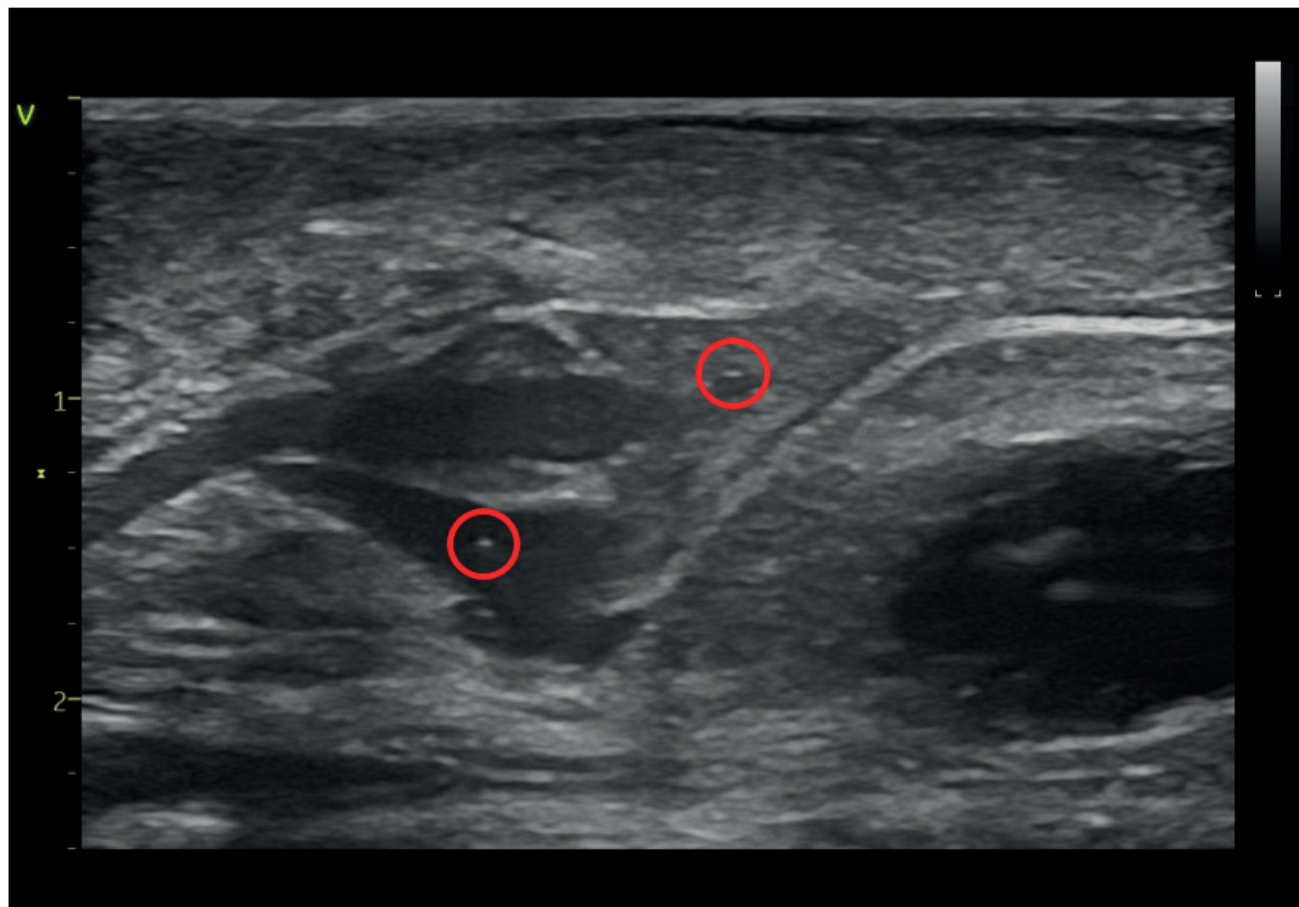
For påvisning av bobler i systemisk sirkulasjon kreves mer inngående undersøkelser. Tidvis kan bobler påvises for eksempel i hjertekamre og på kuttflate av lever ved obduksjon av fisk med gassboblesyke. Men som i humanmedisinen må ultralyd betraktes som gullstandarden for vurdering av forekomst av gassbobler i systemisk sirkulasjon. Ved plassering av ultralydproben over hjertet oppnås god oversikt over blodet som passerer gjennom hjertet. Påvisning av hvite (hyperekkogene) runde strukturer som beveger seg med blodstrømmen er sterkt indikativt på forekomst av gassbobler i blodet (figur 3). Men, på samme måte som innen dykkemedisin er ikke påvisning av bobler i fiskens blodsirkulasjon synonymt med klinisk sykdom; funn må vurderes opp mot det observerte kliniske bildet.

Et annet fellestrekk mellom dykkersyke hos mennesker og gassboblesyke hos fisk er stor individvariasjon i det kliniske bildet, selv under identiske betingelser (Speare, 2010).

Atferdsobservasjoner kan bidra til det diagnostiske arbeidet ved trykkfallssyke hos laks. Unormale bevegelser som har blitt beskrevet i litteraturen og som ble observert i forbindelse med kontrollerte forsøk i NYBRØK var periodevis inaktivitet, likevektsproblemer, samt raske og rykkvise (spastiske) bevegelser ofte etterfulgt av tap av likevekt. Dersom slik atferd observeres i forbindelse med at fisk har vært utsatt for trykkfall, er det grunn til å være på vakt, da dette har blitt vist å være assosiert med øket dødelighet både i tidligere forsøk (Beyer et al., 1976; Pleizier et al., 2020) og i NYBRØK-prosjektet.

Faktorer som påvirker forekomsten av gassboblesyke

Blodtrykket vil til en viss grad forebygge utviklingen av gassboblesyke, da blodtrykket er høyere enn trykket i omgivende



Figur 3: Ultralyd av hjerte hvor det under opptak ble observert to bevegelige, hvite (hyperekkogene) strukturer (angitt med sirkler) forenelig med gassbobler i blod.

vann. Det arterielle blodtrykket er igjen høyere enn blodtrykket i venøs sirkulasjon. Det er derfor grunn til å anta at ved gassboblesyke forårsaket av trykkreduksjon, vil gassbobler først oppstå på venøs side hvor trykket er lavest. Dette i motsetning til gassboblesyke forårsaket av totalgassovermetning ved atmosfærisk trykk, hvor gassen i stor grad tas opp over gjellenes lameller før det transporteres ut til vev fra arteriell side. Selv om dette forholdet ikke har blitt systematisk undersøkt, er det grunn til å tro at dette vil kunne gi forskjeller i distribusjon av gassbobler innledningsvis i sykdomsutviklingen.

Videre vil stoffskiftet gjennom forbruk av oksygen redusere deltrykket av oksygen og dermed faren for å utvikle gassbobler i systemisk sirkulasjon (Beyer et al., 1976). Forbruket av oksygen betyr at for en gitt totalgassovermetning, 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 gassovermetning uten å ta 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 utviklingen av gassboblesyke, og særlig høyden på vannsøylen som fisken har tilgjengelig er avgjørende. 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 + barometrisk trykk) overstiger TGP (det totale gasstrykket av alle gasser i

vann) vil det ikke lenger være grunnlag for bobledannelse. Dypet hvor dette inntreffer kalles kompensasjonsdypet, og fisk som svømmer under kompensasjonsdypet kan ikke utvikle gassboblesyke. Dette betyr også at risikoen for å utvikle gassboblesyke er høyest i overflaten og avtar gradvis nedover til kompensasjonsdypet.

Veien videre

I denne artikkelen har vi diskutert mekanismer som kan gi gassboblesyke hos fisk, og noe av bakgrunnen for de kontrollerte forsøkene som er utført i det FHF-finansierte prosjektet NYBRØK. Vi har vist at laks kan utvikle gassboblesyke ved trykkforhold som er relevante for næringen. Videre viser prosjektet at dødelighet forårsaket av trykkfallindusert gassboblesyke er vanskelig å avdekke i ettertid. Visuell inspeksjon av særlig finner og gjeller kan gi nyttige indikasjoner, og ultralyd viste seg å være meget nyttig 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 gassboblesyke hos fisk.

Som følge av en teknologisk utvikling og større brønnbåter, pumpes fisken med

større høydeforskjeller enn hva som var vanlig før. Gassboblesyke som et resultat av trykkfall er derfor en problemstilling av økende relevans.

Det er trolig urealistisk å unngå trykkreduksjon for fisk i oppdrett, og det vil derfor være viktig å bestemme grenseverdier for trykkfallstoleranse og tilhørende totalgassmetning over tid og for ulike fiskestørrelser. Fremtidig arbeid bør fokusere på forebyggende arbeid hvor det etterstrebes å redusere trykkfall, både med hensyn til størrelse og tid.

Referanser

- Beyer, D. L., D'Aoust, B. G., Smith, L. S. (1976). *Decompression induced bubble formation in salmonids: comparison to gas bubble disease*. Undersea Biomedical Research, 3(4).
- Colt, J. (1986). *Gas supersaturation - Impact on the design and operation of aquatic systems*. Aquacultural Engineering, 5(1). [https://doi.org/10.1016/0144-8609\(86\)90005-1](https://doi.org/10.1016/0144-8609(86)90005-1)
- Colt, J. (2012). *Supersaturation of Gases*. In J. Colt (Ed.), *Dissolved Gas Concentration in Water* (pp. 133–178). Elsevier.

Colt, J. E. (1983). *The computation and reporting of dissolved gas level*. Water Research, 17(8). [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(83\)90157-4](https://doi.org/10.1016/0043-1354(83)90157-4)

Pleizier, N. K., Algera, D., Cooke, S. J., Brauner, C. J. (2020). *A meta-analysis of gas bubble trauma in fish*. Fish and Fisheries, 21(6), 1175–1194. <https://doi.org/10.1111/faf.12496>

Speare, D. (2010). *Disorders Associated with Exposure to Excess Dissolved Gases*. In J. F. Leatherland P.T.K. Woo (Eds.), *Fish Diseases and Disorders, Volume 2: Non-infectious Disorders* (Vol. 2, pp. 342–356). CABI. <https://doi.org/https://doi.org/10.1079/9781845935535.0342>



TOBIAS

Tobias 25 Admiral

Allsidig arbeidsbåt for mange oppgaver!
Båten kan leveres i mange versjoner, tilpasset kundens behov. Båten har dyp kjøll og gode sjøegenskaper, men også god fart.

Lengde: 780 cm
Bredde: 300 cm
Dyppgående: 100 cm
Motor: 140-370 hk
Diesel eller elektrisk framdrift
Fart: 24 knop m/ 240 hk

Tobias Båt AS 5943 Austrheim
tlf. 56169079 mail@tobias.no

www.tobias.no