

Risikoanalyse- Nitrogenovermetning-Gassblæresyke

Oppdrag

I forbindelse med etableringen av et nytt akvakulturanlegg i Smedvågen er det ønskelig med en risikovurdering knyttet til nitrogenovermetning. Nitrogenovermetning kan utløse tilstanden gassblæresyke hos oppdrettslaks.

Anlegget skal baseres på resirkulering og blant annet produsere fisk helt frem til slaktestørrelse. Et resirkuleringsanlegg resirkulerer vann ved hjelp av å flytte vannet med et stort antall pumper. Vannet kjøres gjennom en rekke ulike sumper og kummer før og etter at vannet har gått gjennom fiskekarene. Dette sammen med bruken av oppvarmet vann og innløsning av store mengder oksygen øker risikoen for innsuging av luft og en forstyrrelse i gasslikevekten mellom vann og atmosfære inne i RAS-anlegg.

Risikomatrise MarinHelse AS

5	10	15	20	25
4	8	12	16	20
3	6	9	12	15
2	4	6	8	10
1	2	3	4	5

>12	Kritisk
6-12	Betydelig
<6	Ubetydelig

Sannsynlighetsmodell

Nivå	Sannsynlighet
1	>10 år
2	5-10 år
3	2-5 år
4	0,5-2 år
5	< 0,5 år

Konsekvensmodell

	Nivå	Beskrivelse
1	Ubetydelig	Ubetydelige skader eller belastninger på mennesker, fisk og/eller materielle verdier
2	Mindre alvorlig	Små skader eller belastninger på mennesker, fisk og/eller materielle verdier

3	Alvorlig	Alvorlige skader og belastninger på mennesker, fisk og/eller materielle verdier
4	Kritisk	Kritiske skader på mennesker, fisk og/eller materielle verdier
5	Katastrofal	Katastrofal skade eller belastning på mennesker, fisk og/eller materielle verdier

Aktuell vurdering:

Forutsetninger:

Etablering av en gassovermetning i kar i avdelinger hos Averøy Industripark i form av nitrogen.

Risikofaktorer	Ønsket beskyttelsesnivå	Sannsynlighet	Konsekvens	Risiko	Risikohåndtering
Se under eget punkt «Vurdering av risikofaktorer» For omfattende til å plassere i en tabell		> 10 år (1)	Kritisk (4)	4	

Tabell 1 og 2 for beskrivelse av risiko er hentet fra «Gassovermetning i vassdrag – en kunnskapsoppsummering» 2018 Ulrich Pulg, Trond Einar Isaksen, Gaute Velle, Sebastian Stranzl, Espen O. Espedal, Knut W. Vollset, Einar Bye-Ingebrigtsen, Bjørn T. Barlaup. Disse tabellene beskriver risikobildet på en mer konkret måte enn hva som vil være tilfelle med den standardiserte risikomatriksen som vanligvis benyttes og er derfor tatt med i denne vurderingen.

Risiko	Betydning	Forventet effekt
Lav	Effekter relatert til gassblæresyke ikke sannsynlig	Ingen dødelighet eller kroniske effekter sannsynlig
Middels	Målbare effekter i dyr sannsynlig, hovedsakelig subletal	Subletale effekter sannsynlig, for eksempel, gassbobler, blødninger, sekundærinfeksjoner, på lang sikt også dødelighet
Høy	Første tilfeller av akutt gassblæresyke sannsynlig	Sannsynlig at dyr begynner å dø
Svært høy	Akutt gassblæresyke i de fleste fisk sannsynlig	Sannsynlig med høy dødelighet (> 50 %)

Tabell 1: Risikovurdering for gassblæresyke som følge av eksponering for gassovermetning

Gassmetning [% TDG]	<1 time	<10 timer	<100 timer	<1000 timer
<105 %	Lav*	Lav*	Lav*	Lav ^[?]
105-109 %	Lav*	Lav*	Moderat ^[?]	Moderat ^[?]
109-114 %	Lav*	Lav*	Høy ^[?]	Høy*
114-116 %	Lav*	Høy*	Svært høy*	Svært høy ^[?]
116-122 %	Høy ^[?]	Svært høy*	Svært høy*	Svært høy ^[?]
122-132 %	Høy ^[?]	Svært høy*	Svært høy ^[?]	Svært høy ^[?]
> 132 %	Svært høy*	Svært høy ^[?]	Svært høy ^[?]	Svært høy ^[?]

Tabell 2: Risiko for effekter på Atlantisk lakseparr ved gassovermetning

Vurderinger knyttet til nitrogenovermetning hos Averøy Industripark

Averøy Industripark er et resirkuleringsanlegg (RAS-anlegg) som flytter på store mengder oppvarmet vann ved hjelp av pumper og har utforminger av prosess-systemet som kan invitere til innsug av luft. Grunnlaget for risikovurderingen baserer seg på oppdatert forskning på nitrogenovermetning i akvakulturanlegg samt erfaringer fra felt. Vi vil se på bakgrunnsstoff og sykdomstegn, samt risikofaktorer og håndtering av en slik overmetningssituasjon.

Bakgrunnsdata nitrogenovermetning

Gassblæresyke hos fisk er en ikke-infeksiøs sykdom som kan forekomme i tilfeller når vannet fisken oppholder seg i, er overmettet med gass (totalgassmetning). Høye gassovermetningsnivåer kan medføre en ikke-reversibel tilstand og dødelighet hos fisk i løpet av kort tid. Tilstanden beskrives gjennom funn av gassbobler i blodbaner og vev. Disse emboliene er svært smertefulle for fisken og utløser store mengder stress som varer i svært lang tid såfremt fisken ikke dør hurtig av skadene.

Gassovermetning er et fenomen der mer gass enn det vannets løsevne tilsier er tilstede. Dette kan altså føre til dannelse av små gassbobler både inni og utenpå fisken. I human dykkermedisin er dette fenomenet beskrevet som "dykkersyke" eller "bends". Siden det alltid er nitrogengass som skaper problemer for dykkere, har begrepet "nitrogenovermetning" også festet seg i akvakultursammenheng. Dette har det vist seg ikke nødvendigvis er tilfellet for fisk. Det er totalgassmetningen heller enn nitrogenmetningen som er avgjørende for om det skal kunne dannes bobler eller ikke. Selv om det finnes begrenset litteratur om grense- eller toleranseverdier for gassovermetning, er indikasjonene at en totalmetning på mer enn 102 % påvirkes fiskens velferd og prestasjoner negativt. Passerer man 110 % overmetning vil man kunne se tydelig blæredannelse i blodbaner, hud og finner samt økende dødelighet. Disse grensene vil sannsynligvis være forskjellige fra art til art, men før sikker kunnskap er etablert bør man sørge for at vannet aldri har mer enn 100% totalgassmetning.

Dannelse av gassbobler i nervevev og tynne blodkapillærer vil kunne forårsake blokkering av nerveimpulser og blodpropper, med påfølgende alvorlige konsekvenser.

Gassovermetning er en tilstand der vannet inneholder mer løst gass pr. volum enn løseligheten tilsier. Metningsgraden av de ulike gassene er uavhengig av hverandre slik at Nitrogen kan være overmettet mens oksygen er undermettet, men det er totalgasstrykket som bestemmer om det kan oppstå gassbobler. Totalgasstrykket er summen av alle deltrykkene.

Mengden av noen gasser kan måles direkte i vann v.h.a. elektroder, så som Oksygen og ammoniakk. Nitrogen derimot kan ikke måles direkte, men bestemmes indirekte utfra målinger av totalgass (TGP) og oksygen, samt temperatur og barometertrykk. Gasser kan løse seg i vann, og vil da fortsatt ha formen som et gassmolekyl. Vannlevende dyr er avhengige av løst oksyngengass, på samme måte som luftåndere trekker oksygen ut fra lufta. Alle aktuelle gasser har en viss løselighet i vann, som man kan finne empirisk og oversette i en tabell. Løseligheten til en gass i vann er også avhengig av temperatur og salinitet. De gassene man finner i vann kan stamme fra innløsning fra

overflaten, eller fra gassproduksjon i vannet, for eksempel av alger.

Når man kjenner løsligheten kan man finne volumet av løst gass v.h.a. Henry's lov:

HENRY'S LOV:

➤ Beregner hvor mye gass som løser seg i et gitt vannvolum

$$V_g = \alpha * \frac{P_g}{760} * V_{H_2O}$$

I Henry's lov er V_g volumet av innløst gass, α er løselighetskoeffisienten, P_g er deltrykket til gassen i luften over væsken og V_{H_2O} er volumet av vann som gassen skal løses i.

Dersom vannet inneholder MER av en gass enn det Henry's lov tilsier, er vannet overmettet med denne gassen.

Det man imidlertid skal være klar over er at det er den totale gassmengden (TGP - Total gas pressure, eller P_{tot}) i vannet som bestemmer om vannet skal være "overmettet". TPG er summen av alle deltrykkene. Dersom denne summen blir høyere enn barometertrykket, vil bobler kunne oppstå. TPG uttrykkes vanligvis som % av fullmetning. Dette er en forståelig og grei måte å uttrykke relativ gassmetning på, sammenlignet med å uttrykke gassmetning som $P_{tot} - P_{bar}$ (Totalgasstrykk i vannet minus barometertrykk)

$$P_{tot} = P_{O_2} + P_{CO_2} + P_{N_2} + P_{Ar}$$

Dersom:

$$P_{tot} > P_{Bar} \implies \text{Gassovermetning}$$

Mengden gass som er løst pr. volum er vanligvis jevnt fordelt i hele vannvolumet fra topp til bunn. Det er imidlertid bare i den helt øverste delen av vannsøylen man normalt opplever en overmetningssituasjon. Dette forklares med det økende hydrostatiske trykket som motvirker tendensen til bobledannelse øker etter hvert som dybden øker. Dette kalles kompensasjonsdyp:

Kompensasjonsdyp

Avstand fra overflate hvor det hydrostatiske trykket av vannsøylen balanserer en gassovermetning:



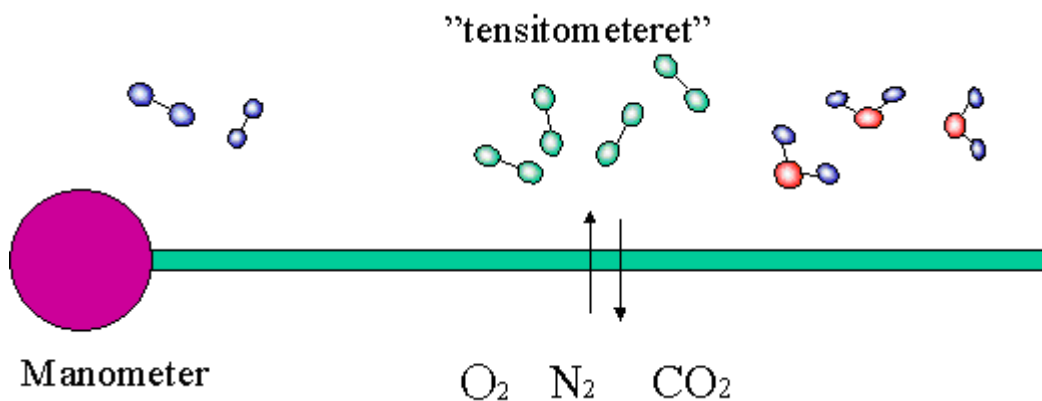
Ingen bobledannelse

I akvakultursammenheng er det TPG man derfor skal være oppmerksom på. Er TPG høyere enn 100% er det svært viktig å vite hvilke gasser som bidrar i overmetningen.

Ifølge Henry's lov vil V_g (mengden gass som KAN løses i et vannvolum øke med økende trykk. På 1 meters dyp vil man derfor kunne tolerere en overmetning på 10% uten fare for bobledannelse. (Siden %TPG refereres til barometertrykk vil metningsgrad alltid oppgis "som ved overflaten").

Måling av TPG

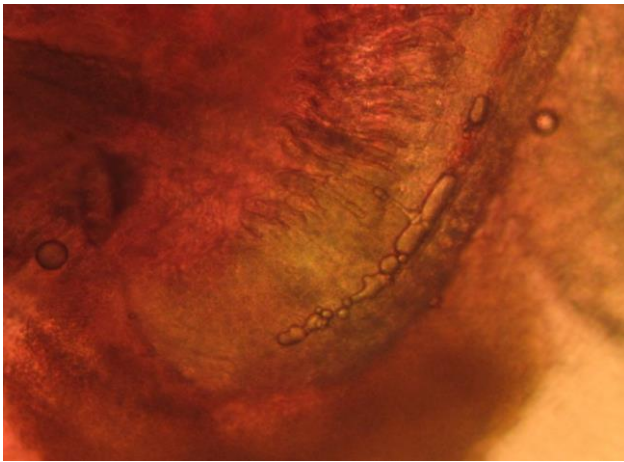
Som nevnt er det flere av de "vanlige" gassene som er vanskelige å måle direkte i sjøvann. Den totale metningen (TPG) er imidlertid enkel å måle med det riktige verktøyet. Tensitometeret eller Saturometeret slik vi kjenner det i dag ble først konstruert av Weiss, en Amerikansk biolog for nærmere 50 år siden. Prinsippet er å måle trykket i et nedsenket gassvolum omsluttet av rigide men gasspermeable (slipper gass gjennom) vegger. På denne måten vil gassen i vannet etter en stund komme i likevekt med gassen inne i tensitometeret, og man kan måle P_{tot} med en vanlig trykkmåler (manometer).



Alle TPG målere arbeider utfra det samme prinsippet. I den senere tid har det imidlertid kommet flere mikroprosessorstyrte modeller på markedet som har innebygde sensorer for oksygen og temperatur, og lufttrykk. Med disse er det mulig å gjøre direkteavlesninger av % metning av både TPG, Nitrogen og oksygen. Skissen viser en gass-del (grønn) som består av en stiv-vegget silikonslange i en lang kveil. I denne slangen foregår utveksling av gass med vann-omgivelsene. Trykket ikke i slangen måles i manometeret (fiolett).

Kliniske funn ved nitrogenovermetningsproblematikk

De skadene som vi finner på fisk som er rammet av nitrogenovermetning varierer avhengig av fiskens utviklingsstadium og nivået av overmetning. De yngste stadiene av laksefisken er de mest sårbare, da ser vi bort fra rognstadiet, hvor det ikke sees problematikk knyttet til dette. Plommeseekkyngel er imidlertid mer sårbar og utsatt for gassovermetning enn større fisk. Det er ikke bare de synlige blærene som skaper utfordringer for fisken. Det faktum at flere vevstyper blir skadet påvirker fiskens fysiologi på mange måter. Epitelcellene i gjellene til fisken blir ofte oppsvulmet som et resultat av gassproblematikken og dette gjør utveksling av ioner og molekyler vanskeligere. Dette kan blant annet påvirke osmoreguleringen til fisken i sjøvann betydelig.



Ved lavgradig overmetningsnivåer fra 102 % og opp mot 106 % kan vi se gassbobler i kapillærene i gjellene til fisken. Dette funnet blir ofte sett på som et forvarsel om at gass-situasjonen i anlegget ikke er under kontroll.

Har man gassmetningsnivåer over 106 % begynner det å dukke opp gassblærer i en rekke organer som ofte sees lett fra karkanten og når man tar opp fisken til undersøkelse og den generelle bakgrunnsdødeligheten øker. Når man nivåer over 110 % så ser man ofte at fisk begynner å dø i større antall og blærene blir synlige i flere organer.



Embolier i blodbanene fører ofte til vevsdød og svært smertefulle tilstander hos fisken. Ved større overmetninger ser man større og tydelige gassblærer både i gjeller, hud og andre vev.



Gassblærer i finner er relativt typisk og det samme er tosidig utstående øyne.

De tre påfølgende figurene er hentet fra arbeidet «Gassovermetning i vassdrag – en kunnskapsoppsummering» 2018 Ulrich Pulg, Trond Einar Isaksen, Gaute Velle, Sebastian Stranzl, Espen O. Espedal, Knut W. Vollset, Einar Bye-Ingebrigtsen, Bjørn T. Barlaup.

Her ble det gjennomført kontrollerte forsøk med ulike gassovermetninger hvorpå fisken ble undersøkt for skader. Disse viser metningsintervallene og det skadeomfang som ble funnet ved de ulike overmetningsprosentene på laksefisk. Resultatene viste akutt gassblæresyke og dødelighet i karene med TDG- konsentrasjoner over 110 %. Typiske kliniske tegn på gassblæresyke i disse gruppene var gassemboli (gassbobler) i gjellekapillærer og indre blødninger som skyldes sprengte blodkar og kapillærer. I tillegg ble det observert gassbobler i finner hos nesten alle fiskene.

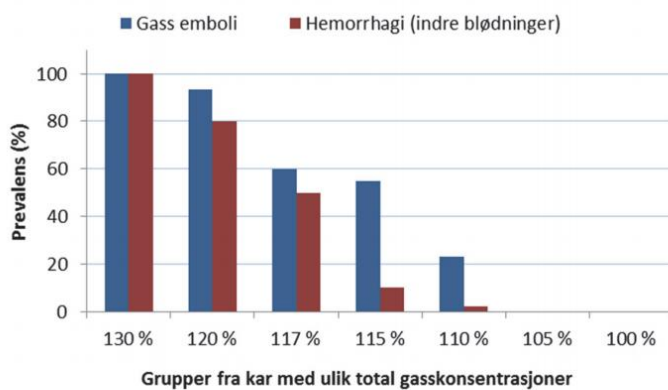


Fig. 17 Andel observerte kliniske tegn på gassblæresyke hos laksepar: Gassemboli (blodpropp i gjellene) og hemorragi (indre blødninger).

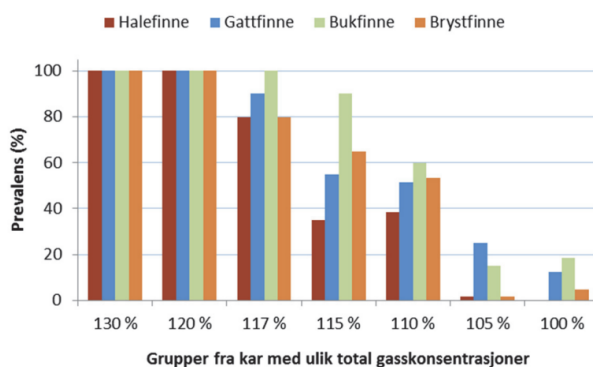


Fig. 20 Andel observerte kliniske tegn på gassblæresyke hos laksepar: Gassbobler i finner.

Tabell 10. Kliniske tegn på gassblæresyke observert hos fisk i kar med ulike nivåer av TDG.

Prevalens (%) av observerte gass embolier (gassbobler) i gjellekapillærer, bobler i finner, gjellelokk (operculum), munnhulen og sidelinjen (laterallinjen). Observasjoner av andre vanlige tegn på gassblæresyke inkluderer hemorragi (blødninger) og eksoftalmus (utstående øyner). Antall fisk undersøkt i hver gruppe er gitt (total n).

Gruppe	T100	T105	T110	T115	T115*	T120	T130
Total N	60	60	60	40	20	60	5
Antall undersøkt N	60	60	59	20	10	15	5
TDG %	99.9±0.8	103.5±0.9	109.7±1.3	115.4±0.9	117-118 ^c	118.8±0.2 ^b	130-135 ^c
Eksponeeringstid	12 dager	12 dager	9 dager	24 timer	8 timer	3 timer	< 1 time
Dødelighet	0	0	< 2 %	50 %	>50 %	>50 %	>50 %
Gass emboli gjeller	0	0	23 %	55 %	60 %	93 %	100 %
Hemorragi	0	0	2 %	10 %	50 %	80 %	100 %
Caudal finne	0	2 %	38 %	35 %	80 %	100 %	100 %
Rygg finne	2 %	5 %	23 %	20 %	90 %	80 %	60 %
Gatt finne	12 %	25 %	52 %	55 %	90 %	100 %	100 %
Buk finne	18 %	15 %	60 %	90 %	100 %	100 %	100 %
Bryst finne	5 %	2 %	53 %	65 %	80 %	100 %	100 %
Gjellelokk	0	0	7 %	0	0	0	0
Munnregionen	0	0	5 %	0	0	0	0
Eksoftalmus	0	0	2 %	0	0	0	0
Sidelinjeorganet	0	0	0	0	0	0	0

Vurdering av den aktuelle risikofaktor

Det er i hovedsak to hovedårsaker til at gassovermetning oppstår

1) Innblanding av luft under trykk, f.eks med tørrstilte pumper, eller ved luftbobling i dype kar. Bobling på 1 m dyp vil i teorien kunne gi 10 % overmetning (110 % TPG). I praksis vil imidlertid dette ikke være tilfelle fordi bobling samtidig lufter av overmetning i de høyere vannlagene.

2) Endring av vannets løselighet. For eksempel ved å øke temperaturen, eller øke saltholdigheten. Et typisk eksempel er at vannet varmes opp etter at det har vært gjennom en tradisjonell kolonnenluffer. Som en tommelfingerregel kan man si at for hver grad vannet økes i temperatur, vil gassmetningen øke med 2 %. De eksakte verdiene finnes i ulike tabellverk

Det er i RAS-sammenheng også en klar mulighet for meddriving av luft i vannmasser når man skaper fossefallsituasjoner i forbindelse med vannets overgang fra et kammer til et annet og luft blir brakt ned på dypere vann. Det er også mulighet for å få gassovermetning når man blander varmt og kaldt vann. Det er nemlig slik at selv om begge vanntypene er 100 % mettet vil det blandede vannet ha en liten overmetning. Som eksempel vil to like volumer av 6 og 12°C vann som begge har 100 % TPG, ha 100,4 % når de blandes. Dette er små endringer sammenlignet med de tidligere nevnte årsakene, og kan i de fleste tilfeller ses bort fra.

Risikoreducerende tiltak

Kun i helt spesielle tilfeller vil man oppleve at vann har overmetning i naturen. Noen eksempler på dette er ved høye forekomster av mikroalger som produserer oksygen, samt i fossefall, der luftbobler blir revet ned på stort dyp. Også i forbindelse med produksjon av vannkraft har det vært eksempler på at vannet nedstrøms har hatt gassovermetning. Man kan imidlertid anta som temmelig sikkert at en marin fisk under naturlige omstendigheter aldri vil oppleve vann med

gassovermetning. Det er derfor lite sannsynlig at fisken har en naturlig fluktnespons i kontakt med gassovermetning. I Akvakultursammenheng er gassovermetning dessverre heller regelen enn unntaket. Smoltprodusenter har lenge vært klar over de svært uheldige virkningene av gassovermetning, og tatt konsekvensene av det. I marin yngelproduksjon har man ikke vært like flinke til å etablere rutiner for å unngå overmetning.

Passive luftere

Ulike passive luftere, så som kolonneluftere og INKA-luftere, har lenge vært på markedet. Disse arbeider etter prinsippet om at vann skal "luftes" mot atmosfærisk trykk. Ved å øke vannets overflate mot luft, vil diffusjonsveiene reduseres og avlufting av overmetning vil kunne skje. Diffusjon er imidlertid en langsom prosess, og i beste fall vil man oppnå et vann med 100 % TPG. En slik løsning fordrer også god ventilasjon og lufting av atmosfæreluften inne i produksjonsavdelingene. Oppvarming av vannet etter lufteren vil føre til gjentatt overmetning.

Aktive luftere (degassere)

Disse kan i teorien arbeide etter to ulike prinsipper:

- 1) Nitrogenstripping ved gjennombobling med oksygen. Dette er en brukbar metode som gir undermetning av nitrogen, og overmetning av O₂ slik at %TPG vil ligge på ca 100. Forhøyet TPG (mer enn 100) kan imidlertid aksepteres så lenge % nitrogenmetning holdes under 100 (helst under 95). Denne metoden krever små investeringer, men blir fort kostbar i drift. Bobling med oksygen representerer også en eksplosjonsfare.
- 2) Fjerning av gass i vakuum. Denne metoden baserer seg på å redusere P_g delen i Henry's lov. Ved å utsette vann for et undertrykk (ca tilsvarende 1 m vannsøyle) vil løseligheten reduseres med ca 10 %. Dette vil føre til en gassovermetning hvor gass fjernes fra vannet. Når vannet "slippes ut" av vakuomet, og trykket blir normalt vil det derimot være undermettet (TPG < BAR). Fordelen med et slikt vann er at det kan tåle en viss oppvarming etter avgassing før overmetning inntreffer. En vacuum-degasser vil derfor være en billig forsikring. Selvsagt kan man "toppe" vannet med oksygen etter behov før det tilføres fisketankene.

Effektiviteten av en vacuum-avgasser avhenger av vacuum, overflate og oppholdstid av vannet i øvre del av lufteren. En løftehøyde på 1m kan teoretisk gi en reduksjon av totalgassen på 10 %. Ved korrekt bruk av vacuum-avgasser vil faren for overmetning elimineres og ekstra oksygen kan tilsettes i neste skritt uten fare.

Det er MarinHelse sin oppfatning at svært mange moderne RAS-anlegg i dag sliter med en lavgradig gassovermetning som påvirker fiskens trivsel og prestasjon negativt. Dette viser målinger i felt over flere år. Det vil derfor være fornuftig, og da særlig i anlegg som skal produsere laksen helt frem til slaktestørrelse, at disse utfordringene adresseres på en ordentlig måte. Fokuset må være på å redusere risikoen for nitrogenovermetning gjennom god anleggsdesign og valg av funksjonelle løsninger for utlufting av gasser.

Anleggsdesign

- Stabil vannbevegelse (Kar, rørgater, Biofilter, bend, kummer)
- Ingen fossefallsområder eller områder hvor luft kan trekkes ned i vanddybden
- Dypstilte pumper og alarmer ved vannspeilsenkninger
- Tilpassede vanninnføringer
- Fokus på innføring av vann fra CO₂-luftere i vannspeilet og ikke i dypere vannlag

Riktig utstyr

- Minst mulig koblinger av rør med muligheter for innsug av luft
- Bruk av aktive luftere
- Fixed bed innebærer muligens større risiko for sedimentering enn moving bed.

Fornuftige produksjonsrutiner under drift

- Sørge for å holde oksygenivåene i området 80- 100 % metning
- Måle TPG regelmessig og gjøre korrigeringer ved avvik

Behandling

Det finnes ingen behandling mot lidelsen. Viser fisk tegn til skader grunnet en episode med nitrogenovermetning anbefales det å gjøre en undersøkelse av stressnivået hos fisken. Avvikende atferd og tilvekst gir en god pekepinn på om fiskegruppen kan føres videre eller om fiskegruppen bør bedøves og tas ut av produksjonen. Fokuset når det gjelder nitrogenproblematikk bør rettes mot forebygging all den tid behandling ikke forefinnes og en lindring av lidelsene kan være tidkrevende og vil utsette fisken for mye smerte og lidelse.

Konklusjon

Med bakgrunn i de overnevnte faktorene er det helt klart en risiko for nitrogenovermetning hos Averøy Industripark AS. Akvakulturanlegget er basert på RAS-teknologi, noe som betyr at det resirkuleres mye vann som flyttes med pumper døgnet rundt.

Det er MarinHelse AS sin oppfatning at utfordringene knyttet til totalgassmetning kan håndteres, kontrolleres og elimineres via et godt fokus på de risikominimerende tiltakene som er listet opp i denne risikovurderingen. I forbindelse med etableringen av Averøya Industripark AS har man hatt muligheten til å treffe preventive tiltak på både utstyrvalg og utformingen av resirkuleringsystem i tidlig planleggingsfase. Dette er av stor fordel. Det har vært et overordnet fokus på vannbevegelse både i selve karene og i det øvrige prosesssystemet i forbindelse med hydrogensulfidgass. Dette arbeidet vil også bidra til å forebygge risikoen for nitrogenovermetning i karene hvor fisken står.

Summen av de foreslåtte tiltakene i risikovurderingen burde være tilstrekkelige til å redusere risikoen for nitrogenovermetning til et akseptabelt nivå. I tillegg burde det være gode muligheter til å stoppe anløp av utbrudd gjennom kontinuerlig overvåking av totalgassmålingene i avdelingene.

Per Anton Sæther
Veterinær
MarinHelse AS

Referanser

Antcliffe, B. L., L. E. Fidler, and I. K. Birtwell. 2002a. "Effect of dissolved gas supersaturation on the survival and condition of juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) under static and dynamic exposure scenarios." In.: Canadian Technical Reports Fisheries and Aquatic Sciences.

Antcliffe, B. L., L. E. Fidler, and I. K. Birtwell. 2002b. 'Effect of dissolved gas supersaturation on the survival and condition of juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) under static and dynamic exposure scenarios', Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences: i.

Beeman, J. W., and A. G. Maule. 2006. 'Migration depths of juvenile Chinook salmon and steelhead relative to total dissolved gas supersaturation in a Columbia river reservoir', Transactions of the American Fisheries Society, 135: 584-94.

Blindheim, B., G. Brox, T. Heggberget, A. Kittelsen, P. Mellquist, and T. Tekle. 1984. "Problemer med luftovermetning i vann fra kraftverk. Komiteen for undersøkelse av gassovermetning (in Norwegian)." In. Oslo: Vassdragsregulantenenes forening.

Bouck, G. R. 1980. 'Etiology of Gas Bubble Disease', Transactions of the American Fisheries Society, 109: 703-07.

Colt, J., G. Bouck, and L. Fidler. 1986. "Review of current literature and research on gas supersaturation and gas bubble trauma." In.: Bonneville Power Administration, Portland, Oregon.

Ebel, Wesley J., and Howard L. Raymond. 1976. 'Effect of Atmospheric Gas Supersaturation on Salmon and Steelhead Trout of the Snake and Columbia Rivers', Marine Fisheries Review, 38: 1-15.

Gabrielsen, S. E., B. T. Barlaup, H. Skoglund, G.A. Halvorsen, O. Sandven, T. Wiers, G.B. Lehmann, B. Skår, U. Pulg, K. W. Vollset, and E. Straume. 2011. "'LIV" – livet i vassdragene. Langsiktige undersøkelser av laks og sjøaurebestander i Matreelva i perioden 2006-2011', LFI-rapport nr. 187. Uni Research Miljø LFI, Bergen.

Geist, D. R., T. J. Linley, V. Cullinan, and Z. Q. Deng. 2013. 'The Effects of Total Dissolved Gas on Chum Salmon Fry Survival, Growth, Gas Bubble Disease, and Seawater Tolerance', North American Journal of Fisheries Management, 33: 200-15.

Harvey, H. H. 1975. 'Gas Disease in Fishes - a review.' in W.A. Adams (ed.), Chemistry and physics of aqueous gas solutions (Journal of the Electrochemical Society: Princeton, New Jersey).

Heggberget, T. G. 1984. 'Effect of Supersaturated Water on Fish in the River Nidelva, Southern-Norway', Journal of Fish Biology, 24: 65-74.

- Marking, L.L. 1987. 'Gas supersaturation in fisheries - Causes, Concerns, and Cures', National Fisheries Research Center, U.S. Fish and Wildlife Service: 15.
- Marsh, M.C., and F.P. Gorham. 1905. 'The gas disease in fishes', Report of U.S. Bureau of Fisheries 1904: 343-76.
- Noble, C., J. Nilsson, L. H. Stien, M. H. Iversen, J. Kolarevic, and K. Gismervik. 2018. 'Velferdsindikatorer for oppdrettslaks: Hvordan vurdere og dokumentere fiskevelferd. ISBN 978-82-8296-531-6. Open acces. ', ISBN 978-82-8296-531-6. Open acces. : 328 p. .
- Pulg, U. , G. Velle, W. K. Vollset, S. Stranzl, and E.E. Olsen. 2018a. 'Gassovermetning i Otra og muligheter for avbøtende tiltak. Technical report. Uni Research Miljø LFI-rapport nr. 319, ' Uni Research Miljø LFI-rapport nr. 319,: 26.
- Pulg,U, Trond Einar Isaksen, Gaute Velle, Sebastian Stranzl, Espen O. Espedal, Knut W. Vollset, Einar Bye-Ingebrigtsen, Bjørn T. Barlaup 2018 «Gassovermetning i vassdrag-En kunnskapsoppsummering». LFI-rapport nr. 312 M-1126/2018
- Rogers, G. 2005. 'Total Gas Saturation Considerations for Recirculating Aquatic Systems', International Journal of Recirculating Aquaculture, 6: 39-48.
- Stenberg, S.K., G. Velle, M.D. Powell, and Å. Åtland. 2018. 'Effekter av gassovermetning på migrerende laksesmolt i Evangervatnet', In: Barlaup, T.B. (red.) Redningsaksjon for Vossolaksen - Fremdriftsrapport per 2017. LFI rapport 300. Uni Research Miljø LFI, Bergen.
- Weitkamp, Don E. 2008. "Total dissolved gas supersaturation biological effects, review of literature 1980- 2007." In, 65.