

Risikoanalyse- Forgifting med hydrogensulfidgass

Oppdrag

I forbindelse med etableringen av et nytt akvakulturanlegg i Smedvågen er det ønskelig med en risikovurdering knyttet til forgifting med hydrogensulfidgass. Anlegget skal baseres på resirkulering og blant annet produsere fisk helt frem til slaktestørrelse. Dette stiller større krav til at det ikke forekommer områder med sedimentasjon av organisk materiale som kan utløse en produksjon av hydrogensulfidgass. Dette gjelder i alle avdelinger inkludert startfôring.

Risikomatrise MarinHelse AS

5	10	15	20	25	>12	Kritisk
4	8	12	16	20	6-12	Betydelig
3	6	9	12	15	<6	Ubetydelig
2	4	6	8	10		
1	2	3	4	5		

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:

Sedimentering av organisk materiale med påfølgende innkapsling og etablering av oksygenfri tilstand i avdelinger hos Averøy Industripark .

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	

Vurderinger under produksjon Averøy Industripark knyttet til hydrogensulfidgass

Averøy Industripark er et resirkuleringsanlegg (RAS-anlegg) som tar inn både ferskvann og sjøvann til sin produksjon og man må derfor påregne en risiko for at det kan oppstå episoder med hydrogensulfidforgiftning. Grunnlaget for risikovurderingen baserer seg på oppdatert forskning på hydrogensulfid i akvakulturanlegg samt erfaringer fra felt. Vi vil se på bakgrunnsstoff og sykdomstegn, samt risikofaktorer og håndtering av gassen.

Bakgrunnsdata Hydrogensulfidgass (H₂S)

Hydrogensulfid (H₂S) er en svært giftig gass som produseres av bakterier som bryter ned slam som får ligge i fred og råtne. Det skal ikke mye opphopning og sedimentering av organisk materiale eller slam til for å produsere mengder med H₂S som er giftig for fisken. For å kunne produsere H₂S trenger bakteriene sulfat. Sulfat forekommer både i ferskvann og i sjøvann, men sjøvann inneholder ca. 1000 ganger mer sulfat enn ferskvann, og dette gjør anlegg med sjøvannstilsetning mer utsatt for H₂S-problemer enn de som bare benytter ferskvann.

Norsk oppdrett av laks har ikke hatt noen betydelig økning i produsert biomasse de siste årene, og siden 2012 har den totale produksjonen av oppdrettslaks, og ørret, ligget mellom 1,2 til 1,3 millioner tonn per år (Fiskeridirektoratet, 2018). Årsaken til dette ligger ikke i mangelen på konsesjons- og produksjonskapasitet, men er i stor grad knyttet til mangelen på biologisk kontroll i sjøfasen. Noen av problemene er parasitter og økende utbrudd av virussykdommer som for eksempel pankreassykdom som er svært utbredt på Vestlandet (Hjeltnes, B. Jensen, Bornø, Haukaas, & S. Walde, 2019).

For å møte disse utfordringene har næringen de siste ti årene fokusert på å flytte deler av produksjonen som tidligere har foregått i sjø til land. Slik har man lyktes i å korte ned på sjøvannsfasen for fisken, slik at tiden den blir eksponert for sjøvann reduseres og utfordringene

knyttet til luseproblematikk spesielt har blitt redusert. Dette har blant annet blitt gjort ved å produsere en større smolt på land, kalt postsmolt eller sågar flyttet hele produksjonen på land som selskapet Fredrikstad Seafood var det første til å gjøre.

Dette har resultert i at det i de siste årene har blitt investert i flere og flere postsmoltanlegg og det etableres stadig flere søknader knyttet til produksjon av slaktefisk i landbaserte anlegg. Ønsket om å produsere mer av biomassen på land, fører til at ferskvannstilgangen for mange oppdrettere blir knapp. Dette har mange valgt å løse ved å gjenbruke produksjonsvannet til fisken. Dette kan gjøres med et resirkulerende akvakultursystem, forkortet til RAS. RAS-anlegg benytter seg av flere vannbehandlingskomponenter, som fjerner organiske og uorganiske stoffer fra vannet, og som gjør det mulig å resirkulere opptil 98% av produksjonsvannet (Kolarevic, Baeverfjord, Takle, Ytteborg, Reiten, Nergård, & Terjesen, 2014). Vannkvalitet er et veldig viktig tema i RAS-anlegg, da feil i vannbehandlingskomponentene kan påvirke vannkvaliteten og dermed fiskehelsen. RAS-anlegg har ført med seg flere utfordringer, blant annet den giftige gassen hydrogensulfid (H₂S), noe 57,2% av oppdrettere med RAS-anlegg svarer de har erfart i fiskehelsesrapporten 2018 (Hjeltnes et al., 2019). H₂S nevnes også som en betydelig faktor i en konsekvensanalyse av landbasert oppdrett gjort av SINTEF Ocean (Hilmarsen, A. Holte, Brendeløkken, Høyli, & S. Hognes, 2018).

RAS-teknologi og bruk av sjøvann

Det er lite konkret kunnskap om dagens situasjon for H₂S i RAS-anlegg, og det er vanskelig å finne dokumenterte hendelser og informasjon. Det er imidlertid tall fra forsikringsselskaper som viser at antallet episoder knyttet til H₂S de siste årene har vært over 70. Tallet er fallende de siste to årene og noe av årsaken til dette er økt kunnskap rundt problemstillingen og tilpasninger i bruken av sjøvann i driften i flere selskap og anlegg.

Men det kan se ut til at H₂S er et problem for først og fremst RAS-anlegg, og ikke de mer tradisjonelle gjennomstrømningsanleggene (FT). Dette har sannsynligvis sammenheng med at vannet resirkuleres, og dermed har større sannsynlighet for både å oppkonsentrere H₂S i systemet og å føre H₂S til fisken. Dette kan sees på statistikken til forsikringsselskapet Gjensidige (Gjensidige Forsikring ASA, Norge) over erstatningssaker hos settefiskanlegg i Norge, der vannmiljø står for 25% hos RAS-anlegg og 2% hos FT-anlegg (Egeland, 2019). Ved erstatningssakene på vannmiljø hos RAS-anleggene, er det H₂S-hendelser som har ført til økt dødelighet på fisken. En av de største fordelene med RAS sammenlignet med et FT-anlegg er at det kan driftes uavhengig av årstid, da man holder på vanntemperaturen ved resirkulering av produksjonsvannet. RAS-anlegg for laks holder typisk temperaturen på 12- 14 grader. Det er flere hendelser med store fisketap de siste 10 årene der H₂S mistenkes (Hilmarsen et al., 2018), men det er få som er dokumenterte.

I et typisk RAS-anlegg består vannbehandlingskomponentene av et mekanisk filter, biofilter, lufter og oksygenkjegler, og enkelte systemer bruker i tillegg denitrifikasjonsfiltre og fosforfelling ved ekstra høy resirkulasjonsgrad (Lekang, 2013). Det benyttes også pH-regulering ved buffertilsetning og salt eller sjøvann for å regulere saliniteten. Ofte er systemet designet slik at alt vannet går igjennom alle komponentene i en sløyfe, mens enkelte har systemkomponenter som tar ut en delstrøm fra sløyfen for vannbehandling. Uansett design går vannet gjennom flere komponenter og steg sammenlignet med et FT-anlegg, der vannet blir brukt kun en gang før det går ut av anlegget.

Det første steget etter at vannet har vært i karet, er mekanisk filtrering som fjerner organiske stoffer, avføring og fôrrester, som utgjør partikkelmengden i vannet (Dalsgaard & Pedersen, 2011). Det er ønskelig å fjerne disse partiklene så effektivt som mulig, da de kan være substrat for uønskede bakterier (Pedersen, von Ahnen, Fernandes, Naas, Pedersen, & Dalsgaard, 2017), påvirke gjellene til fisken (Au, Pollino, Wu, Shin, Lau, & Tang, 2004), og sedimentere ukontrollert. Dette kan skape anaerobe soner, som vil produsere H₂S-gass fra de anaerobe sedimentene (Dunnette, Chynoweth, & Mancy, 1985).

Etter mekanisk filtrering går vannet gjennom et biofilter. To typer biofilter, som ofte brukes innenfor fiskeoppdrett, er neddykkede biofiltre med fiksert eller bevegelig biomedium. Biofilteret er fylt med biomedium for å øke overflaten som bakteriene kan vokse på, og er det som angir effektiviteten til biofilteret sammen med vannmiljøet (Ebeling & Timmons, 2012; Lekang, 2013). Fikserte biofilter, kalt fixed bed biofilter reaktor (FBBR), må vaskes for å unngå at partikler etter hvert tetter filteret. Bevegelige biofilter, kalt moving bed biofilter reaktor (MBBR), trenger ikke å vaskes da biomedium blir satt i bevegelse med luft, og er i konstant bevegelse som hindrer at partikler samler seg. Biofilterets oppgave er hovedsakelig å håndtere nitrogenforbindelser. Fisken skiller ut ammoniakk, som omdannes til nitritt og så til nitrat, av bakterier i biofilteret (Ebeling & Timmons, 2012; Lekang, 2013). Ammoniakk (NH₃) og nitritt (NO₂⁻) er giftig for fisken i små mengder, og mattilsynet har satt veiledende grenseverdier på 2 µg/L NH₃ og 0,1 mg/L NO₂⁻ (Hjeltnes, Bæverfjord, Erikson, Mortensen, Rosten, & Østergård, 2012). Nitrat er kun giftig i større konsentrasjoner over 75 mg/l, som vist på regnbueørret (Davidson, Good, Welsh, & Summerfelt, 2014; Westin, 1974). Det anbefales å holde konsentrasjonen av NO₃⁻-N under 100 mg/l for postsmolt laks i RAS-anlegg (Davidson, Good, Williams, & Summerfelt, 2017).

Etter biofilteret blir vannet «luftet» for blant annet å fjerne CO₂ som fisken skiller ut (Lekang, 2013). Slik unngår man for høye konsentrasjoner som kan være skadelig og veksthemmende for fisken dersom det får akkumulere i vannet (Mota, Nilsen, Gerwins, Gallo, Ytterborg, Bæverfjord, Kolarevic, Summerfelt, & Terjesen, 2019). Etter lufteren tilsettes oksygen, ofte via oksygenkjegler, for å holde ønsket nivå av oksygen for fisken. RAS-anlegg må dimensjoneres etter produksjon og fôring slik at det er mulig å holde ønsket vannkvalitet i systemet (Terjesen, Summerfelt, Nerland, Ulgenes, Fjæra, Megård Reiten, Selset, Kolarevic, Brunsvik, Bæverfjord, Takle, Kittelsen, & Åsgård, 2013). Størrelsen på komponentene dimensjoneres etter biomasse produsert, som igjen bestemmer hvor mye som må fôres. Vannskiftet beregnes ut fra fôr som blir tilsatt systemet, og nytt vann per kilo fôr kan brukes som en benevning på dette.

Giftigheten av H₂S, symptomer hos fisk

H₂S er en giftig gass både for mennesker og dyr, og har en sterk, gjenkjennelig lukt av råtne egg (Manahan, 1994). Det har blitt rapportert at en 20 minutters akutt dose på 22-29 µM H₂S per liter, som tilsvarer 0,95 mg/l, førte til betraktelig stress og betydelig skader på gjellevev hos atlantisk laksesmolt på 150-200g (Kiemer, Black, Lussot, Bullock, & Ezzi, 1995). De viktigste observasjonene var fortykning av primære lameller mens sekundære lameller klumpet seg og fusjonerte. Kiemer et al. (1995) avdekket også at kronisk konsentrasjoner på 0,25 mg/L over 18 uker førte til skader på lever hos laksesmolt på 40-55g, men uten at vekten ble påvirket. Fisken viste også delvis tegn til tilpasning, og det oppstod ingen økt dødelighet. På regnbueørret- (*Oncorhynchus mykiss*) og brunørretyngel (*Salmo trutta*) er H₂S vist å være giftig i langt lavere konsentrasjoner. På brunørretyngel var akutt 96 timers LC₅₀ (dødelig dose for 50% av individene etter 96 timer) på 7

µg/liter (Reynolds & Haines, 1980), og for regnbueørret var konsentrasjonen på 12,7 µg/liter (Smith, 1976). I tillegg har det blitt vist at små kroniske konsentrasjoner av H₂S kan ha en positiv effekt på overlevelsen til fisk (Reynolds & Haines, 1980; Smith Jr, Oseid, Kimball, & El-Kandelgy, 1976). På brunørretyngel ble det vist at en kronisk konsentrasjon på 2-5 µg/liter over 8 og 22 dager, ga 100 % overlevelse, mens kontrollgruppen med 0 µg/liter hadde en dødelighet på 8-15%. Grunnen til dette er at man tror H₂S kan ha en antibiotisk effekt (Smith Jr et al., 1976), men det er også observert at fisk likevel viser ubehag ved mindre aktivitet og økt respirasjon, selv om disse observasjonene ikke kunne kvantifiseres (Reynolds & Haines, 1980). Ulike fiskearter har også ulik toleranse overfor for H₂S. Smith (1976) foreslår en akutt grense på 8,7 µg/liter for regnbueørret, mens tilsvarende grense for gullfisk foreslåes til 84 µg/liter. Det har vært flere tilfeller av H₂S -forgiftning hvor man ikke har funnet store forandringer på fiskens gjeller og forskningen er noe ulik på dette området. Noen påpeker kliniske forandringer på fisken andre ikke.

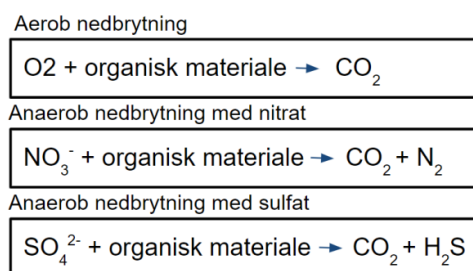
Når det gjelder andre bevis for at H₂S er blitt dannet, så vet man at H₂S er korrosivt og reagerer sterkt med metaller og da dannes det svarte flekker på overflater.

Da det per i dag ikke finnes mye forskning eller artikler på hydrogensulfid i RAS-anlegg, blir kloakksystemer og erfaringer fra oljenæringen det nærmeste relevante forskningsområdet, som til en viss grad har lignende problemstillinger med gassen (Zhang, De Schryver, De Gusseme, De Muynck, Boon, & Verstraete, 2008).

Hydrogensulfid (H₂S) er en naturlig forekommende gass, som finnes i mange biologiske systemer, og kan være veldig farlig da den hindrer ånderettsmetabolismen (Forgan & Donald, 2016). H₂S har en molekylvekt på 34,08g og er i likevekt med bisulfid (HS⁻) og sulfid (S²⁻) (Reiffenstein, Hulbert, & Roth, 1992). Alle disse svovelforbindelsene utgjør den totale sulfidkonsentrasjonen, og fordelingen er avhengig av pH (Yongsiri, Hvitved-Jacobsen, Vollertsen, Tanaka, Yongsiri, BertrandKrajewski, & Chebbo, 2003). Dette gjør at H₂S og HS hovedsakelig er de aktuelle forbindelsene i et kloakksystem, da pH ligger på rundt 7 (Yang, Vollertsen, Hvitved-Jacobsen, Yang, & Matos, 2005). Det samme prinsippet vil gjelde i et RAS-system der pH også normalt ligger mellom 7,0-7,5. Sulfid er ikke aktuell i RAS-sammenheng da andelen av denne først øker ved pH 12, som er et uaktuelt nivå i fiskeproduksjon. Dannelse av hydrogensulfid og organisk nedbrytning H₂S kan forekomme naturlig ved anaerob bakteriell nedbrytning av organisk materiale ved redusering av sulfat, og i kloakksystemer skjer dette ofte i biofilm eller sedimenter under vann (Beardsley, Krotinger, & Rigdon, 1958; Carpenter, 1932; Parande, Ramsamy, Ethirajan, Rao, & Palanisamy, 2006). Det er også observert at H₂S-produksjon skjer lettere i kloakksystemer med lav vannhastighet under 30cm pr sekund, dårlig lufting og temperaturer på 15-20 °C (Hvitved-Jacobsen, Vollertsen, Tanaka, Hvitved-Jacobsen, Stuetz, & Boon, 2000).

På 80-tallet ble H₂S-produksjon fra sedimenter under oppdrettsmerder mistenkt å forårsake sykdommer og redusert tilvekst ved anlegg som hadde vært i drift i 2 år (Braaten, Aure, Ervik, & Boge, 1983). Dette ble bekreftet ved funn av svart slam uten dyreliv som luktet av hydrogensulfid (Aure, Ervik, Johannessen, & Ordemann, 1988). Så lenge oksygen er tilstede, vil det fungere som elektronakseptor for nedbrytning av organisk materiale til karbondioksid (CO₂). Når oksygen forsvinner vil bakteriene begynne å redusere nitrat (NO₃⁻) for å kunne fortsette nedbrytningen, dette kalles denitrifikasjon. I denne prosessen er dinitrogen (N₂) og CO₂ produktene som dannes. Når nitrat forsvinner, vil sulfat (SO₄²⁻) bli den neste foretrukne elektronakseptoren for de anaerobe bakteriene. I disse tilfellene blir det produsert H₂S (Manahan, 1994). Dette kan visualiseres med

forenklede ligninger, som i Figur 3 (modifisert fra Manahan, 1994). I sjøvann finnes det naturlig større mengder sulfat, enn i ferskvann. I sjøvann finner man opptil 2700 mg/l sulfat (Morris & Riley, 1966), mens i ferskvann er konsentrasjonen betydelig lavere. Gjennomsnittlig sulfatkonsentrasjon i Glomma var 3,93 mg/L i 2018 (NRVA, 2018). FN's miljøovervåking for vann har også anslått at vanlig sulfatkonsentrasjon i ferskvann ligger på rundt 20 mg/L på verdensbasis (UNEP Water, 1987). Derfor vil det trolig være et høyere potensiale for H₂S-produksjon i sjøvann enn ferskvann.



Figur 3: Organisk aerob og anaerob nedbrytning med oksygen, nitrat og sulfat. Modifisert fra figurer og ligninger av Manahan, (1994).

Figur hentet fra masteroppgave Simen langeteig 2019

H₂S i RAS-anlegg kan ha flere kilder. Det har vært tilfeller med store mengder tapt fisk, der H₂S mistenkes, og utbruddet har blitt opplevd som plutselig, og fra intet. Det er rapportert at partikler har sedimentert ett sted i systemet, og skapt anaerobe soner med slam som fører til produksjon av H₂S, og tap av fisk (Sørgård, 2019). I andre tilfeller kan det være at stillestående vann, i for eksempel ubrukte rør, som skaper anaerobe forhold og produserer H₂S. Små mengder av gassen kan også trolig komme fra biofilm i anlegget. RAS-anlegg har store overflater når man inkluderer hele systemet med kar, rør og vannbehandling. Det er vist at redokspotensialet synker jo dypere man går inn i biofilmen, og at reduksjon av sulfat finner sted i anaerobe soner i biofilmen (Yu & Bishop, 1998). Det har blitt rapportert at oksygen er oppbrukt 550µm ned i biofilmen fra overflaten, og at reduksjonspotensialet minker raskt i et lag på 50µm mellom den aerobe og anaerobe sonen i biofilmen (Bishop & Bishop, 1998). Ved tykk biofilm vil man derfor kunne forvente en betydelig H₂S-produksjon i RAS.

Vurdering av den aktuelle risikofaktor

Kjente risikofaktorer

- a) Generell produksjon av H₂S i små mengder i alle RAS-anlegg

Mikronivå (Biofilm)

- I de innerste lagene på ethvert biolegeme (innerste delen av biofilmen)
- Ved avskalling av disse lagene kan det sedimenteres eller frigis i «partikulær» form

- b) Opphopning av sedimenter

Makronivå (Sediment)

- I stillestående vann, vann i lav bevegelse
- I kar hvor vann blir innestengt
- I rørsystemer med dødsoner,
- I alle større betongkummer hvor dødsoner uten sirkulering etableres

- I områder hvor dødfisk/organisk materiale kan hopes opp og innkapsles
- c) Bruk av sjøvann
- For at hydrogensulfid skal kunne dannes i et RAS-anlegg må sulfat være tilstede i vannet. I havet er sulfatkonsentrasjonen ca. 30 millimol per liter, noe som tilsvarer 960 g svovel per m³. Sagt på en annen måte er det rundt 2700 mg sulfat/l sjøvann. I ferskvann er det rundt 5-50 mg sulfat/l. Forekomsten av mer sulfat gjør at det skal mindre mengder med sediment for at det skal kunne føre til en forgiftning med dødelig utgang.
- d) Manglende detekteringsrutiner
- For å unngå utfordringer knyttet til H₂S, så må man etablere rutiner for å avdekke områder hvor sedimentering kan oppstå. Disse avdekkes bedre ved gode vaskerutiner etter endt produksjon i et «Alt inn Alt ut» konsept.

Risikoreducerende tiltak

Det er MarinHelse sin oppfatning at det ikke vil være fornuftig og bærekraftig på sikt å unngå bruk av sjøvann for å redusere risikoen for H₂S-forgiftninger i RAS-anlegg. Ferskvann er en knapphetsressurs, mens sjøvann representerer et utømmelig reservoar av produksjonsvann med mange svært gode og verdifulle egenskaper. Fokuset må være på å redusere risikoen for H₂S-forgiftning på tross av at man benytter sjøvann i produksjonen.

Anleggsdesign

- Stabil vannbevegelse (Kar, rørgater, Biofilter, bend, kummer)
- Ingen dødsoner, blindområder
- Skråbunn på alle kummer med mulighet for drenering
- Vanninnføringer og avløp på karnivå må være fokusert på god vannbevegelse

God partikkelfjerning

- Riktig fôr, unngå overføring, forsiktig ved sjokktapping
- Fjern partikler tidlig i prosessen (ecotrap, Optitrap, beltefilter, trommelfilter)
- Fixed bed innebærer muligens større risiko for sedimentering enn moving bed.
- Proteinskimmer etter Moving Bed
- Membranrensing

Fornuftige produksjonsrutiner under drift

- Det skal være sirkulasjon i alle kar og rør til enhver tid, dette gjelder også transportrør som ikke brukes kontinuerlig
- Sørge for å holde oksygenivåene rundt 100 % metning
- pH bør ligge rundt 7,4 ved normal drift
- Hold nitratkonsentrasjonen over et minimum på 40-50 mg/l
 - Skaper en buffer mot H₂S hvis oksygenet skulle droppe i biofilm eller slamansamlinger
 - Så lenge nitrat er tilstede i produksjonsvannet vil nitrat reagere med sulfat og danne nitrogengass og vann istedet for redusere sulfat til sulfid, som er det som skjer når det ikke er mer oksygen igjen og det ikke er tilgjengelig nitrat.

- Bruk av Ozon i en loop for å oksidere H₂S (fører sulfid tilbake til sulfat) og samtidig få et betydelig klarere vann og visuell kontakt med fisken. Dette vil også føre til at biofiltrene holder seg renere.
- Holde alkaliteten mellom 100-200 mg/l
- Høyt redokspotensial vil hjelpe (mV høy), noen har erfart et dropp i redokspotensial like før det «smeller».
- Tilsetning av nitratforbindelser (Kalsiumnitrat) ved oppstart av produksjon og i perioder med mye spedevann (flytting, levering til sjø) eller ved sulting.

Regelmessig desinfeksjon og vask

- «Alt inn alt ut» konsept
- Kontroll av produksjonslinje etter endt produksjon med fokus på områder med sedimentering, svarte flekker
- Regelmessig nedvask av biofilterenhet med kar etter hver produksjonsperiode

Overvåkning av H₂S-situasjonen

- Det finnes automatiske målestasjoner fra produsenter som Blue Unit (Blue Unit A/S, Danmark), der målinger kan utføres flere ganger hele døgnet, for blant annet H₂S.
- En annen metode som kan benyttes, er “diffusive gradient i tynne filmer”, kalt DGT (Teasdale, Hayward, & Davison, 1999). Disse blir også kalt passive målere, da de ikke aktivt måler mengden H₂S i vannet, men reagerer med mengden i vannet over tid. Avhengig av konsentrasjonen av H₂S tilstede, vil DGT-måleren gi en gradient av gråfarge som kan analyseres og H₂S belastningen for perioden kan regnes ut. Disse målerne er sensitive overfor lys og høye temperaturer, og må derfor oppbevares mørkt og kjølig.

Behandling

Det er mulig å stanse et utbrudd under oppseiling hvis man har gode overvåkningsrutiner samt teknisk utstyr som kan bistå i å monitorere utviklingen av H₂S i produksjonen. Følgende tiltak er utprøvd i flere anlegg og har vist seg å ha god effekt.

- Stopp fôring
- Økning av pH til 7,9-8,0 (husk fare for ammoniakkforgiftning)
- Økning i oksygenivå (husk fare for totalgassproblematikk)
- Sørg for at det er nok nitrat til stede, ønsket konsentrasjon rundt 70 mg/l
- Tilsetning av Kalsiumnitrat (kalksalpeter) (5,85 kg Kalsiumnitrat/1000 m³ resirkvann øker nitratkonsentrasjonen med 1 mg/l) for å øke og holde nitrat rundt 70 mg/l
- Fjern dødfisk fortløpende

Beredskap: Ha alltid 2-5 tonn kalsiumnitrat (kalksalpeter) stående i anlegget samt litt ammoniumsalt til biofilteret ved lengre sulting

Konklusjon

Med bakgrunn i de overnevnte faktorene er det en risiko for forgiftning med H₂S hos Averøy Industripark AS. Akvakulturanlegget er basert på RAS-teknologi, noe som betyr at det resirkulerer mye vann og holder forholdsvis høye temperaturer gjennom hele året. Siste del av produksjonen fra 150 gram og frem til 5300 gram vil skje i full salinitet og det skal føres ut store mengder fôr i denne fasen. Dette er faktorer som øker risikoen for å oppleve episoder med H₂S-forgiftning.

Det er MarinHelse AS sin oppfatning at utfordringene knyttet til hydrogensulfidgass 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 bygningsmasse, utforming av resirkuleringsystem og driftsplan 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. Dette vil bidra til å forebygge risikoen for opphopning av organisk materiale. Dette tiltaket kombinert med gode rutiner for nedvask og kontroll av evt. sedimentering i etterkant av en ferdig produksjon i en biofilterenhet i sammenheng med det etablerte «All in All out» konseptet, vil hurtig avdekke om det er en økt risiko for sedimentering og hvor. Hvis så skulle være tilfelle må det legges opp til å korrigere for disse svakhetene.

Summen av de foreslåtte tiltakene i risikovurderingen burde være tilstrekkelige til å redusere risikoen for H₂S-forgiftninger til et akseptabelt nivå. I tillegg burde det være gode muligheter til å stoppe anløp av utbrudd gjennom den foreslåtte overvåkning og de tiltak som er skissert under utbrudd.

Per Anton Sæther
Veterinær
MarinHelse AS

Referanser

- Simen Langeteig (2019) MSc Ocean Resources ved Institutt for biologi ved NTNU: «Bakgrunnsnivåer av hydrogensulfid i RAS, produksjon av hydrogensulfid fra fiskeslam ved ulike saliniteter, og effekten av å tilsette nitrat».
- Allen, L. (1949). The effect of nitro-compounds and some other substances on production of hydrogen sulphide by sulphate-reducing bacteria in sewage. *Applied Microbiology*, 12(2), 26-38.
- AquaMS. (2018). Dissolved H₂S and sulphides measurements. Retrieved from <http://www.aquams.com/submersible-probes/dissolved-h2s/?lang=en>
- Aure, J., Ervik, A., Johannessen, P., & Ordemann, T. (1988). Resipientpåvirkning fra fiskeoppdrett i saltvann. *Fisken og Havet*, 53-87.
- Bentzen, G., Smit, A. T., Bennett, D., Webster, N. J., Reinholt, F., Sletholt, E., & Hobsont, J. (1995). Controlled dosing of nitrate for prevention of H₂S in a sewer network and the effects on the subsequent treatment processes. *Water Science and Technology*, 31(7), 293-302. doi:[https://doi.org/10.1016/0273-1223\(95\)00346-O](https://doi.org/10.1016/0273-1223(95)00346-O)

Dalsgaard, J., & Pedersen, P. B. (2011). Solid and suspended/dissolved waste (N, P, O) from rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*, 313(1), 92-99.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2011.01.037>

Davidson, J., Good, C., Welsh, C., & Summerfelt, S. T. (2014). Comparing the effects of high vs. Low nitrate on the health, performance, and welfare of juvenile rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* within water recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, 59, 30-40.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2014.01.003>

Davidson, J., Good, C., Williams, C., & Summerfelt, S. T. (2017). Evaluating the chronic effects of nitrate on the health and performance of post-smolt Atlantic salmon *Salmo salar* in freshwater recirculation aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, 79, 1-8.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.08.003>

Dunnette, D. A., Chynoweth, D. P., & Mancy, K. H. (1985). The source of hydrogen sulfide in anoxic sediment. *Water Research*, 19(7), 875-884. doi:10.1016/0043-1354(85)90146-0

Ebeling, J. M., & Timmons, M. B. (2012). Recirculating aquaculture systems. In Wiley-Blackwell (Ed.), *Aquaculture production systems* (pp. 246-277).

Egeland, S. (2019). Hvorfor bryr forsikringselskapene seg om H₂S? . Paper presented at the TEKSET 2019, Trondheim. <https://tekset.no/wp-content/uploads/2019/02/PRES-2.2-TEKSET-2019-Hvorfor-bryr-forsikringselskapene-seg-om-H2S-Stine-Egeland-Gjensidige.pdf>

Fernandes, P., Pedersen, L.-F., & Pedersen, P. B. (2015). Microscreen effects on water quality in replicated recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, 65, 17-26.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2014.10.007>

34

Forgan, L. G., & Donald, J. A. (2016). Subchapter 103C - Hydrogen Sulfide. In Y. Takei, H. Ando, & K. Grasshoff, K., Kremling, K., & Erhardt, M. (1999). Determination of hydrogen sulphide. In *Methods of Seawater Analysis* (3 ed., pp. 91-100). Kiel: Wiley-VCH.

Hjeltnes, B., B. Jensen, B., Bornø, G., Haukaas, A., & S. Walde, C. (2019). Fiskehelse rapporten 2018 (6A). Retrieved from <https://www.vetinst.no/rapporter-ogpublikasjoner/rapporter/2019/fiskehelse-2018>

Hjeltnes, B., Bæverfjord, G., Erikson, U., Mortensen, S., Rosten, T., & Østergård, P. (2012). Water quality parameters and potential risk factors related to fish welfare. In VKM (Ed.), *Risk Assessment of Recirculation Systems in Salmonid Hatcheries (09-808-Final ed., pp. 17-25): VKM*.

Hvitved-Jacobsen, T., Vollertsen, J., Tanaka, N., Hvitved-Jacobsen, T., Stuetz, R., & Boon, A. (2000). An integrated aerobic/anaerobic approach for prediction of sulfide formation in sewers. *Water Science & Technology*, 41(6), 107-115.

Højgaard, J. K. (2017). Mass mortality in RAS – Solved? Retrieved from Denmark: <http://www.aquacircle.org/images/pdfdokumenter/efterret18/Mass%20mortality%20in%20RAS%20Solved-final.pdf>

Kiemer, M. C. B., Black, K. D., Lussot, D., Bullock, A. M., & Ezzi, I. (1995). The effects of chronic and acute exposure to hydrogen sulphide on Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *Aquaculture*, 135(4), 311-327. doi:[https://doi.org/10.1016/0044-8486\(95\)01025-4](https://doi.org/10.1016/0044-8486(95)01025-4)

Kolarevic, J., Bæverfjord, G., Takle, H., Ytteborg, E., Reiten, B. K. M., Nergård, S., & Terjesen, B. F. (2014). Performance and welfare of Atlantic salmon smolt reared in recirculating or flow through aquaculture systems. *Aquaculture*, 432, 15-25.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.03.033>

Krumins, V., Ebeling, J. M., & Wheaton, F. (2001). Ozone's effects on power-law particle size distribution in recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, 25(1), 13-24.
doi:[https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(01\)00064-4](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(01)00064-4)

Lekang, O. I. (2013). Ammonia Removal, Traditional Recirculation and Water Re-use Systems. In Wiley (Ed.), *Aquaculture engineering, second edition* (2 ed., pp. 179-189, 190-200).

- Manahan, S. E. (1994). Aquatic microbial biochemistry. In *Environmental Chemistry* (pp. 139-178, 681- 682): Lewis publishers.
- Morris, A. W., & Riley, J. P. (1966). The bromide/chlorinity and sulphate/chlorinity ratio in sea water. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 13(4), 699-705.
doi:[https://doi.org/10.1016/0011-7471\(66\)90601-2](https://doi.org/10.1016/0011-7471(66)90601-2)
- Mota, V. C., Nilsen, O. N., Gerwins, J., Gallo, M., Ytteborg, E., Baeverfjord, G., Kolarevic, J., Summerfelt, S. T., & Terjesen, B. F. (2019). The effects of carbon dioxide on growth performance, welfare, and health of Atlantic salmon post-smolt (*Salmo salar*) in recirculating aquaculture systems. *Aquaculture*, 498, 578-586.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.08.075>
- Reiffenstein, R., Hulbert, W. C., & Roth, S. H. (1992). Toxicology of hydrogen sulfide. *Annual review of pharmacology and toxicology*, 32(1), 109-134.
- Reynolds, F. A., & Haines, T. A. (1980). Effects of chronic exposure to hydrogen sulphide on newly hatched brown trout *Salmo trutta* L. *Environmental Pollution*, 22(1), 11-17.
doi:[https://doi.org/10.1016/0143-1471\(80\)90077-X](https://doi.org/10.1016/0143-1471(80)90077-X)
- Smith, L. L. (1976). Goldfish, Rainbow trout. In *Effect of hydrogen sulfide on fish and invertebrates* (pp. 72-101, 176-197): US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development.
- Summerfelt, S. T., Hankins, J. A., Weber, A. L., & Durant, M. D. (1997). Ozonation of a recirculating rainbow trout culture system II. Effects on microscreen filtration and water quality. *Aquaculture*, 158(1), 57-67. doi:[https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(97\)00064-1](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(97)00064-1)
- Sørgård, E. (2019). Konstruksjonsmessige utfordringer kan få store konsener styreleder Erik Søgård Nordnorsk smolt. Paper presented at the TEKSET 2019, Trondheim.
<https://tekset.no/wpcontent/uploads/2019/02/PRES-2.1-TEKSET-2019-Konstruksjonsmessige-utfordringer-kanf%C3%A5-store-konsener-styreleder-Erik-S%C3%B8g%C3%A5rd-Nordnorsk-smolt.pdf> 36
- Terjesen, B. F., Summerfelt, S. T., Nerland, S., Ulgenes, Y., Fjæra, S. O., Megård Reiten, B. K., Selset, R., Kolarevic, J., Brunsvik, P., Bæverfjord, G., Takle, H., Kittelsen, A. H., & Åsgård, T. (2013). Design, dimensioning, and performance of a research facility for studies on the requirements of fish in RAS environments. *Aquacultural Engineering*, 54, 49-63.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2012.11.002>
- Åtland, Å., & K. Stenberg, S. (2019). Vannkvalitet. In *Veterinærinstituttet* (Ed.), *Fiskehelse rapporten 2018* (pp. 96-99): Veterinærinstituttet.