

22



Fiskens fysiologi i samspill med miljø og teknologi

Kari J. K. Attramadal^{1,2} og Martin Førre²

¹Nofitech, ²Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

SAMMENDRAG

Fisk i oppdrett har behov og begrensninger som må ivaretas for etisk, effektiv og lønnsom produksjon. Siden fiskens vekst og overlevelse påvirkes av mange fysiske, kjemiske og biologiske faktorer i omgivelsene, er det derfor viktig å ha kunnskap rundt samspillet mellom fiskens fysiologi og produksjonsmiljø og -teknologi. Fiskens toleransegrenser og evne til sykdomsmotstand er sentrale faktorer i dette samspillet, og varierer med energistatus, genetikk, stadium og historikk, samt vannkvalitet. Miljøet som fisken utsettes for avhenger av produksjonsform, og er i åpne merder gitt av de naturlige forholdene på lokaliteten, mens det i lukka systemer styres mer av teknologien som brukes og oppdretter. Uansett teknologi avhenger produksjonen av at fisken får tilgang på oksygen og fôr og et levelig fysisk, kjemisk og mikrobielt miljø der avfallsstoffene som produseres ikke hopper seg opp til problematiske nivåer. De enkleste (semi-)lukka systemene er gjennomstrømsystemer på land og lukka merder i sjø. I gjenbruks-, resirkulerings- og zero exchange systemer blir vannet i varierende grad rensset for avfallsstoffer før det gjenbrukes. Med økende gjenbruk av vann blir flere rensetrinn nødvendige, noe som fører til at avfallsstrømmene konsentreres. Oppsamling og gjenbruk av næringsstoffer vil derfor bli viktigere framover, både for å unngå lokal eutrofiering i sårbare områder, men aller mest for å ta vare på næringsstoffene for gjenbruk til fôr og gjødsel. Det er grunn til å tro at muliggjørende teknologier som dynamisk modellering, datakorrelasjon og automasjon vil bli viktig i fremtidens oppdrettsnæring i Norge. Riktig bruk av slike verktøy for å videreutvikle dagens industrielle praksis vil forhåpentligvis føre til at framtidens oppdrettsanlegg gir god fiskehelse, høy overlevelse og best mulig vekst med et minimalt forbruk av vann, fôr og energi og best mulig bruk av avfallsstrømmene fra systemet.

22.1 FISKENS BEHOV I OPPDRETT

Fisk i oppdrett har flere forskjellige behov som må være tilfredsstillt for etisk, effektiv og lønnsom produksjon. I denne seksjonen skal vi ta for oss en del av de sentrale behovene fisk i oppdrett har og forklare mekanismene bak dem.

22.1.1 Energibudsjett

Produksjon av levende organismer er bare mulig gjennom å ta hensyn til biologiske behov og begrensninger. Et nyttig verktøy for å forstå biologiske behov og begrensninger er å se på effektene av ytre faktorer på enkeltindividets energistatus. Tilgjengelig energi er begrenset, og energibruk og -fordeling prioriteres derfor til enhver tid i tråd med individets evolusjonært baserte strategi for best mulig reproduksjon ved gitte betingelser. Dersom kravet til energi på et tidspunkt overstiger energilageret, dør individet. Det kan hjelpe å tenke på energibudsjettet som et oppladbart batteri, eller et personlig økonomisk budsjett.

22.1.2 Mål og innsatsfaktorer i oppdrett

Et typisk mål for oppdrett av fisk er å produsere mest mulig fiskefilet av god kvalitet med lavest mulig ressursbruk. Optimal produksjon innebærer dermed både høyest mulig overlevelse og best mulig vekst. Viktige innsatsfaktorer for oppdretter i denne forbindelse er fôr, tid, energi, plass (volum og fotavtrykk), vannforbruk og penger. For å oppnå høy overlevelse må oppdretter som nevnt over sikre at kravene til energibruk aldri overstiger energilagrene til fisken. For optimal vekst må oppdretter legge til rette for at mest mulig av den tilgjengelige energien går til vekst, og ikke til andre formål.

22.1.3 Fôr

Fra fôret utnytter fisken både de nødvendige byggesteinene for vekst og, ved hjelp av oksygen, den energien som trengs for å leve. Fôrsammensetningen er viktig for at fisken skal få alle ernæringsmessige behov dekket, utvikle seg normalt og kunne vokse raskt. For å utnytte fôret best mulig er det viktig at det er balansert i forhold til fiskens behov. Fiskens ernæringsmessige behov er forskjellig mellom arter og det kan endre seg underveis i livsløpet. Selv når fôrsammensetninga er god og fôrutnyttelsen er høy, er det en del av fôret fisken ikke tar opp, og som kommer ut som avføring. Fra energien i fôret som spises blir omtrent halvparten tilgjengelig for fisken, mens ca. 15% tapes som varme til omgivelsene, og resten av energien (ca. 35%) er igjen i avføringa (for detaljer se kapittel 13 Energetikk og vekst). Under forbrenninga av fôret for energiutvinning forbruker fisken oksygen (O_2) og produserer det nitrogenholdige avfallsstoffet ammoniakk (NH_3) og det karbonholdige avfallsstoffet karbondioksid (CO_2).

22.2 FAKTORER SOM PÅVIRKER VEKST OG OVERLEVELSE

Fisken påvirkes av mange faktorer i omgivelsene; fysiske, som vannstrøm, lys og temperatur; kjemiske, som pH, CO_2 og oksygen; og biologiske som virus, bakterier, alger og sopp. Alle disse faktorene må holdes innenfor toleransegrensene til fisken for at den skal overleve og vokse godt. Fisken bruker minst energi på tilpasning og kompensering når disse variablene er i det som regnes som det optimale området. Om en enkelt faktor er litt høyere eller lavere enn dette området, må fisken bruke energi for å kompensere for den fysiologiske belastningen det innebærer. Jo mer den enkelte faktoren beveger seg fra det optimale området, jo mer energi koster det for fisken. Det koster mer energi å tilpasse seg brå endringer enn gradvise. For eksempel vil den samme laksen trives fint ved en stabil temperatur på enten 8 eller 14°C, men den kan etter hvert dø dersom man skifter fram og tilbake mellom 8 og 14°C hver time, fordi den ikke rekker å komme seg igjen mellom hver tilpasning. Siden flere av faktorene påvirker hverandre, vil kostnaden for kompensering og tilpasning mot flere faktorer samtidig ofte være større til sammen enn den sammenlagte belastningen for hver faktor isolert. Om en av faktorene alene krever mer tilpasning enn det fisken har energi til, og altså da per definisjon befinner seg utenfor toleranseområdet til fisken, vil fisken dø selv om alle andre variable er optimale. Når alle variable er innenfor toleransegrensene er det summen av belastning og energistatusen til fisken som til enhver tid avgjør hva individet tåler.

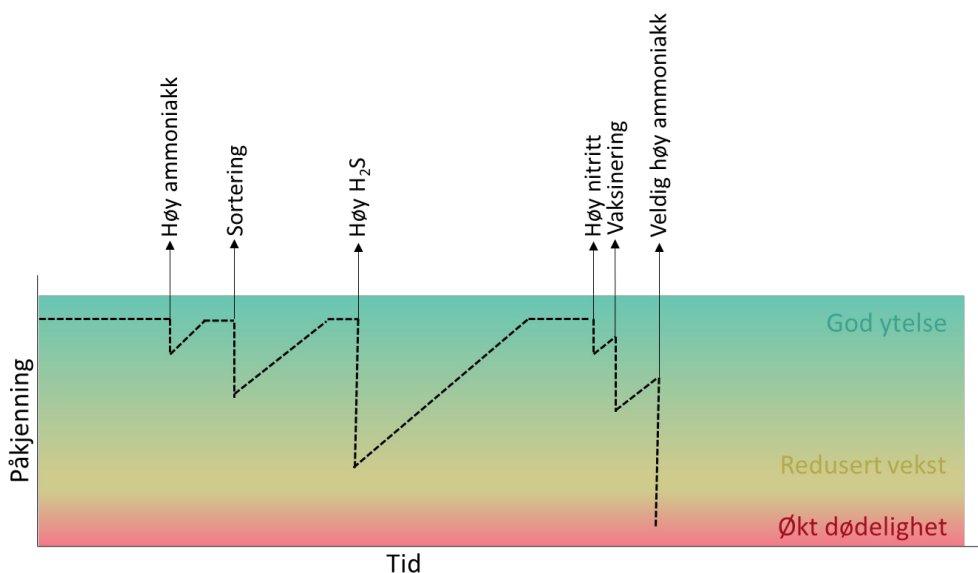
For flere avfallsstoffer og relevante forurensninger påvirker pH i vannet indirekte toleransegrensene til fisken gjennom å påvirke den relative mengden av ulike former av stoffer som har forskjellig giftighet for fisken. Et viktig eksempel på dette er likevekten mellom giftig ammoniakk (NH_3) og mindre giftig ammonium (NH_4^+), der **høyere** pH i vannet gir relativt mer av den giftige gassformen som lettere passerer gjennom gjellene til fisken enn den mindre giftige ioneformen. To andre eksempler er likevektene mellom henholdsvis CO_2 og HCO_3^- og mellom H_2S og HS^- der **lavere** pH i vannet gir relativt mer av de giftige gassformene som lettere passerer gjennom gjellene til fisken, enn de mindre giftige ioneformene. Andre eksempler på pH-avhengig giftighet er aluminium og andre metaller som kan foreligge på giftige og mindre giftige former.

22.2.1 Tilpasning

Fisk er gode til å tilpasse seg endringer i omgivelsene, så lenge de skjer innenfor toleransegrensene. Laks er tilpasset en oppvekst i elver og vann med ulike, og ofte svært varierende forhold, og er derfor en spesielt tilpasningsdyktig art. Dette gjør også at det er en art som fungerer godt i oppdrett, fordi den vokser og overlever relativt greit selv om ikke alt er optimalt. Et viktig poeng er at det da også sannsynligvis er enda større muligheter for å hente ut betydelig bedre vekst, overlevelse og fiskevelferd utover «helt grei produksjon» ved å tilby fisken optimale forhold, sammenlignet med mer «vanskelige arter» i oppdrett som har strengere krav i utgangspunktet. Fordi laksen er så tilpasningsdyktig er det vanskelig å bedømme status på en fiskegruppe siden denne kan oppføre seg og vokse som forventet over et relativt stort spenn fra «helt topp» ned til «akkurat nok» energilagre. Det er først når fisken virkelig sliter med at de samlede utfordringene tapper energilagrene alvorlig at oppdretteren ser slapp atferd, redusert appetitt, dårlig vekst og økende dødelighet. Dette er en utfordring i arbeidet med å forbedre produksjonen, siden det da kan være for seint å iverksette tiltak.

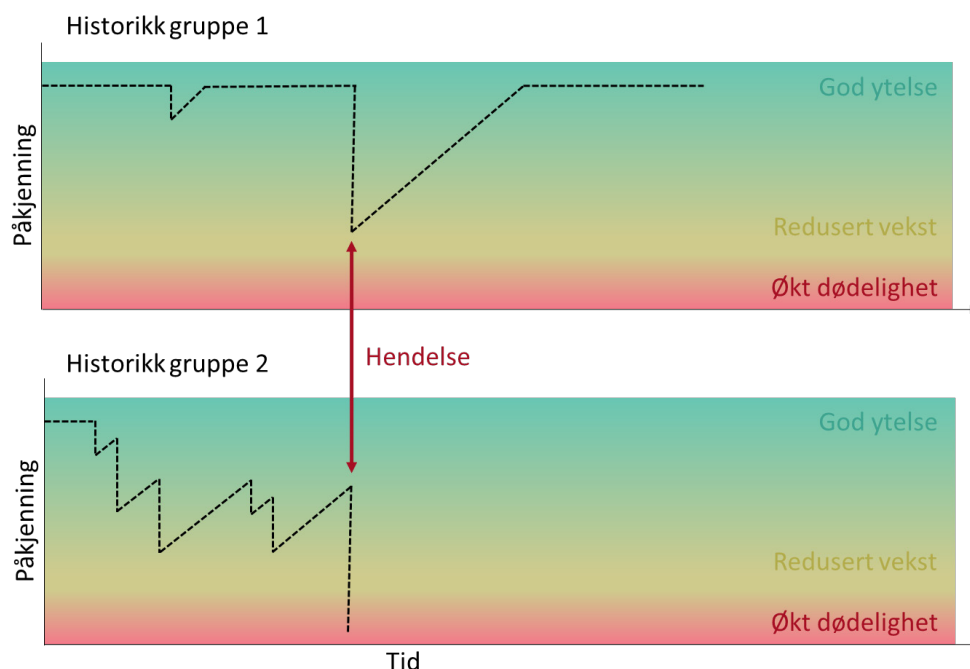
22.2.2 Fiskens historikk

Selv om det tilsynelatende er liten forskjell på prestasjonen fra fiskegrupper med ulike nivå av «greie» energilagre, utgjør det en stor forskjell i risiko i produksjonen. Etter hver tilpasning til suboptimale betingelser, og etter hver akutt eller kronisk belastning, tar det tid før fisken klarer å hente seg inn og få energistatusen opp igjen. Jo større påkjenning, jo lengre tid tar det for fisken å komme seg. En ny belastning rett etter den forrige sender derfor fiskens energistatus enda lavere, og utgjør dermed en større risiko for redusert vekst og død, enn om de samme hendelsene rammet med større mellomrom i tid. Historikken til fiskegruppa vil dermed ha stor betydning for hvor mye belastning den tåler, og for prestasjonen i produksjon. **Figur 1** illustrerer disse prinsippene i en tidslinje som beskriver utviklingen av energilagre for en fiktiv fiskegruppe. Ulik historikk kan også gi seg utslag i at hendelser som enkelte fiskegrupper overlever fint kan vise seg å være kritiske eller direkte dødelige for fiskegrupper som har vært utsatt for større kumulativ påkjenning i forkant av hendelsen (**figur 2**). I oppdrett er det en del operasjoner som må gjennomføres, som flytting, sortering og vaksinerings av fisk. Selv med svært effektiv og skånsom teknologi vil disse operasjonene medføre en viss påkjenning på fisken, og redusere energistatus. I tillegg går fisken gjennom sårbare biologiske stadier der appetitt og motstandskraft reduseres og dermed påvirker energilagrene, som for eksempel under smoltifisering. For å ta hensyn til historikken til fiskegruppa må man se vannkvalitet, nødvendige operasjoner, fiskens utviklingsstadier og andre belastninger i sammenheng og over tid.



Figur 22.1. Historikken til fiskegruppa har betydning for hvordan den presterer i produksjonen, hvor mye den tåler og risiko for tap. Belastninger som suboptimal vannkvalitet, smoltifisering og vaksinerings krever energi fra fisken. Fisken oppfører seg og vokser som forventet over et relativt stort spenn av energistatus (grønt område). Først når energistatusen er svært lav får man synlige effekter som slapp atferd, redusert appetitt og dårlig vekst (gult område), og økende dødelighet (rødt område). Etter hver påkjenning tar det tid før fisken klarer å hente seg inn og få energistatusen opp igjen. Jo større påkjenning, jo lengre tid tar det for fisken å komme seg. En ny belastning rett etter den forrige utgjør en større risiko for redusert vekst og død, enn om tilsvarende påkjenninger rammer med større mellomrom i tid, som vist i dette eksempelet.

Figur 22.2 Fiskegrupper med ulik historikk kan reagere veldig forskjellig på akkurat samme utfordring, som vist i dette eksempelet. Her utsettes fiskegruppe 1 og 2 for samme hendelse, men har vidt forskjellig respons; der fiskegruppe 1 kommer seg igjen, opplever fiskegruppe 2 økt dødelighet. Historikken til fiskegruppa har stor betydning for hvor mye belastning den tåler, og for prestasjonen i produksjon.



22.2.3 Livshistoriestrategi

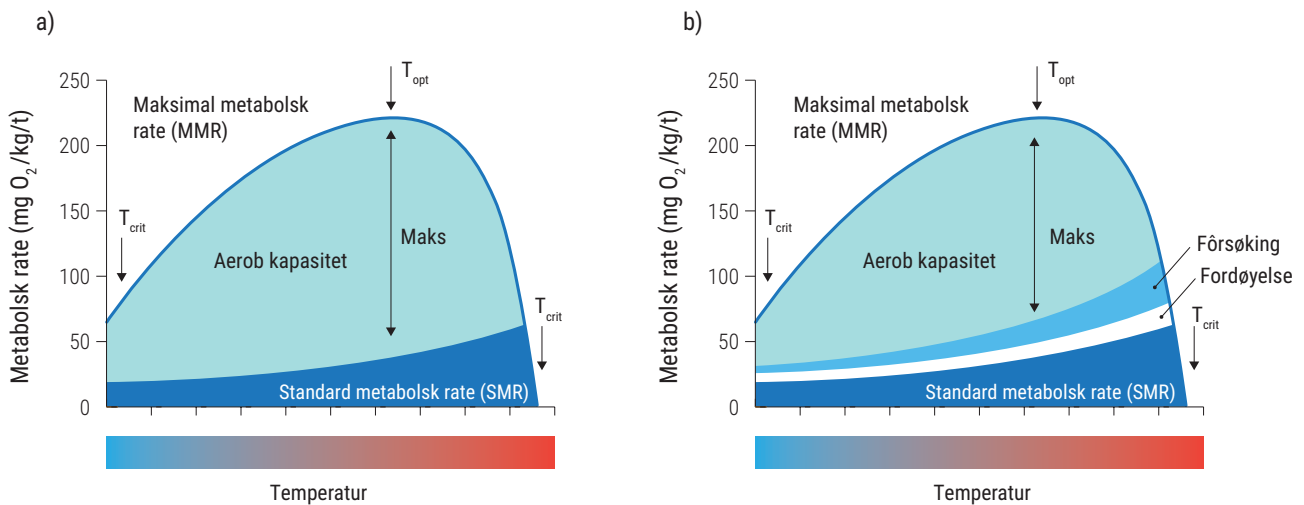
Livshistoriestrategien er mønsteret for timingene av viktige hendelser i livsløpet til fisken. Dette mønsteret er utviklet gjennom artens evolusjon, og reflekterer hva som har lønt seg for å oppnå best mulig overlevelse og reproduksjon i naturen. For laks er viktige hendelser yngelutvikling, smoltifisering, kjønnsmodning og reproduksjon. Fisken har fleksibilitet innenfor hvert utviklingsstadium som gjør at timingene av neste hendelse kan tilpasses det fysiske og økologiske miljøet. For eksempel har laksen et såkalt «smoltvindu» i utviklingen der den utvikler sjøvannstoleranse. Innenfor smoltvinduet avhenger det eksakte tidspunktet for smoltifisering for et individ av flere indre og ytre faktorer. Laksen bruker flere ulike signaler til å tolke miljøet rundt og egen energistatus for å avgjøre om det sannsynligvis lønner seg å vente litt til eller smoltifisere nå, for å maksimere sjansen for overlevelse og reproduksjon i framtiden (se også kapittel 10 om smoltifisering). Det samme gjelder kjønnsmodning. Om fisken er stor nok og har gode energiresurser, vil den vurdere om det vil lønne seg å satse på kjønnsmodning eller videre vekst for å maksimere total reproduksjon (se også kapittel 17 om reproduksjon). Signaler som brukes for å ta disse avgjørelsene er blant annet endring i daglengde, temperaturendring, saltholdigheten i vannet, hormoner fra andre individer og egen størrelse og kondisjonsfaktor.

22.2.4. Genetikk

Genetikk og epigenetikk har stor betydning for fisken i oppdrett. Individer med forskjellig genetisk bakgrunn kan for eksempel prioritere litt forskjellig i livshistoriestrategihendelser som smoltifisering og kjønnsmodning. Ulike stammer av samme art kan ha litt ulikt optimalt område og toleransegrense for forskjellige faktorer. Noen individer vokser litt fortere, mens andre er gode på sykdomsmotstand.

22.2.5 Temperatur

Fisken er poikiloterm (vekselvarm), som betyr at kroppstemperaturen følger omgivelsestemperaturen. Det betyr at alle metabolske prosesser, og dermed vekst og avfallsproduksjon, går saktere ved lave vanntemperaturer og raskere med økende temperaturer opp til en optimal temperatur for vekst. Fra energien fisken får ut av føret må den først sikre opprettholdelse av de grunnleggende livsfunksjonene, resten kan brukes til andre ting som vekst og aktivitet. Standard energibehov er minimumsenergien fisken trenger for å opprettholde grunnleggende livsfunksjoner under hvile ved en gitt temperatur. Den maksimale mengden energi det er mulig for fisken å hente ut av maten per tidsenhet ved en gitt temperatur er den maksimale metabolske raten, eller maksimalt oksygenopptak. Den optimale temperaturen for vekst (T_{opt}) er der det er størst forskjell mellom fiskens standard energibehov (SMR) og maksimale metabolske rate (MMR), som illustrert i **figur 22.3**. Ved denne temperaturen vil fisken ha mest mulig energi igjen til vekst eller andre formål.



Figur 22.3. Forholdet mellom standard metabolsk rate (SMR) og maksimal metabolsk rate (MMR). Forskjellen mellom disse er aerob kapasitet (aerobic scope), energi som fisken kan bruke til svømming, kjønnsmodning, spising, bekjempelse av sykdom og skade, eller andre aktiviteter. a) Aerob kapasitet er på sitt optimale i de midlere temperaturområdene for dyret (T_{opt}), som gir størst forskjell mellom SMR og MMR. b) Aerob kapasitet synker når fisken har spist, siden den må bruke energi til fordøyelse og fôropptak. Dette tapet av tilgjengelig energi kalles den spesifikke dynamiske virkningen (SDA) (Se kapittel 7 svømmeadferd og oppdrift). Fisken er derfor mer følsom for store energikrav fra omgivelsene etter fôring. Aerob kapasitet synker ved svært høy og lav temperatur og kan ikke lenger opprettholdes ved de kritiske verdiene T_{crit} .

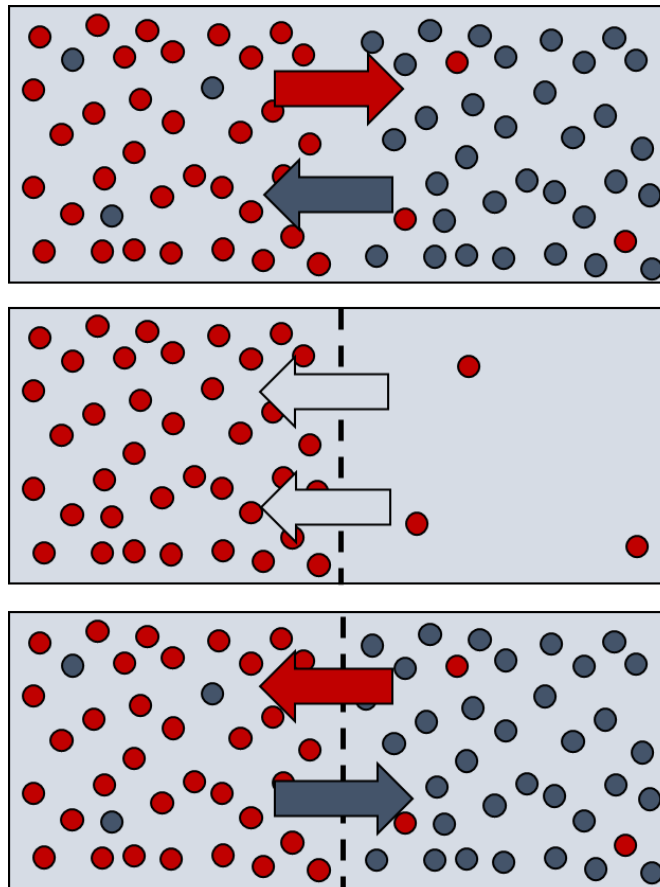
22.2.5 Allostase

For å opprettholde livsfunksjonene må fisken opprettholde et relativt stabilt indre miljø. Enhver utfordring mot dette indre miljøet er en trussel som må håndteres. På kort sikt vil fisken gjøre flere metabolske og endokrine tilpasninger som involverer justeringer i mange ulike organer. Dersom utfordringene er forbigående, vil fisken gå tilbake til utgangspunktet. Dersom endringene er vedvarende, oppnås stabilitet i de indre parameterne ved at fisken permanent endrer de indre settpunktene. Dette kalles allostase, stabilitet gjennom endring. Så lenge fisken kan endre settpunktene og likevel ha et stabilt indre miljø, kan livsfunksjonene fortsette som før. Allostase omtales nærmere i kapittel 18, Stress i fisk. Eksempler på indre faktorer som fisken må ha kontroll over er at pH-balansen, saltbalansen og gassbalansen i kroppen alltid er riktig for å fungere og overleve. Jobben for å opprettholde et konstant indre miljø i møte med skiftende omgivelser krever energi.

22.2.6 Transport av stoffer

Diffusjon er spredningen av et stoff i gass eller væske fra høy til lav konsentrasjon, så stoffet etter hvert blir jevnt fordelt i det volumet som er tilgjengelig. Diffusjon er transport av stoff som alltid går **med** konsentrasjonsgradienten. Osmose er diffusjon av vann gjennom en semipermeabel membran, fra et volum med lav vannkonsentrasjon av oppløst stoff til et volum med høyere konsentrasjon av det oppløste stoffet, mens stoffet som er løst, holdes tilbake. Diffusjon og osmose skjer av seg selv, og krever ikke energi. Aktiv transport er derimot energikrevende transport av stoffer **mot** konsentrasjonsgradienten, fra et område med lav, til et område med høy, konsentrasjon av stoffet.

Figur 22.4 Transport av stoffer: diffusjon (øverst) er transport **med** konsentrasjonsgradienten, og krever ikke energi. Osmose (midten) er diffusjon av vann gjennom en semipermeabel membran. Aktiv transport av stoffer **mot** konsentrasjonsgradienten (nederst) krever energi.



22.2.7 Gjellene

Gjellene er et svært viktig organ for fisken. De er i konstant og direkte kontakt med omgivelsene, og gjennomtrengelige for mange stoffer. Over gjellene skjer både diffusjon, osmose og energikrevende aktiv transport av stoffer mellom vannet og fisken. Fisken er avhengig av gjellene for opptak av oksygen, for å kvitte seg med avfallsstoffene CO_2 og ammoniakk, og for å opprettholde homeostase. Gjellene avslører ofte tidlig om fisken sliter med noe, og kan derfor brukes til å evaluere helse, stress og vannkvalitet.

22.2.8 Gassutveksling

Opptak av oksygen og utskillelse av CO_2 fra blodet over gjellene er drevet av konsentrasjonsforskjellen mellom fisken og vannlaget utenfor. Fisken bruker oksygen for å nyttiggjøre seg energien i føret til å leve og vokse. Det blir derfor mindre oksygen inne i fisken enn i vannet, og dette gjør at oksygen diffunderer inn. CO_2 produseres i fisken slik at konsentrasjonen av CO_2 blir større inne i fisken enn utenfor, og CO_2 diffunderer derfor ut av fisken. Blodcellene hjelper til i denne transporten ved å binde oksygenet som diffunderer inn, og frigir i samme reaksjon syre slik at bikarbonat går over til CO_2 -formen som diffunderer ut. Riktig pH i blodet er altså viktig for utvekslingen av oksygen og CO_2 mellom fiskeblodet og vannet. Dersom vannlaget inntil gjelleoverflata har lav konsentrasjon av oksygen og/eller høy konsentrasjon av CO_2 , utfordrer det gassutvekslinga hos fisken. Høy CO_2 i vannet utenfor gjellene fører til mer CO_2 og lavere pH i blodet. Både høy CO_2 og lav pH i blodet gjør utvekslingen av oksygen og CO_2 vanskeligere for fisken ved å redusere blodcellenes kapasitet for oksygenopptak og evne til å frakte oksygen.

22.2.9 Saltbalansen

For å kunne puste og opprettholde den indre salt- og pH-balansen må gjellene være gjennomtrengelige for vann og salter. Fisk har 9-11 ppt salinitet i blodet, uavhengig av om den er tilpasset ferskvann eller sjøvann. Fisk får noe vann og salt fra maten. Salt og vann beveger seg med diffusjon og osmose fra høyere til lavere konsentrasjon. I ferskvann er det mer salt inni fisken enn utenfor, vann går derfor hele tiden inn i kroppen, mens salt tapes. For å opprettholde saltbalansen utfører fisk i ferskvann aktivt energikrevende opptak av salter

over gjellene og skiller vann og fortynnet urin ut fra nyrene. I sjøvann er det omvendt, vann går ut, mens salt går inn i fisken. I sjøvann bruker derfor fisken energi på å motvirke dette ved å drikke mye vann, skille ut en konsentrert urin og aktivt pumpe salt ut av kroppen over gjellene.

Både i ferskvann og i fullt sjøvann koster saltreguleringen energi som kunne vært brukt på vekst og motstandskraft. Ved å redusere konsentrasjonsforskjellen mellom vannet og kroppen, innenfor toleransegrensene, kan man hjelpe fisken å spare energi på saltregulering. Dersom man tilbyr laks noe salt i vannet i ferskvannsfasen, i området 1 til 5 ppt, får man ofte litt bedre vekst. På samme måte har laks i saltvannsfasen mer energi til vekst ved en brakkvannssalinitet på 14 ppt enn i fullt sjøvann på 35 ppt i saltvannsfasen. Salinitet på 8-12 ppt bør derimot sannsynligvis helst unngås, for å sikre at laksen får klare signaler på om den enten skal sjø- eller ferskvannsregulere.

Nyrene er også et viktig organ for saltregulering. Nyrene skiller ut konsentrert saltholdig urin under sjøvannsregulering, og en stor mengde fortynnet urin under ferskvannsregulering. I tillegg til natriumklorid (NaCl), reguleres også kalsium og magnesium. Nyrestein hos fisk er en relativt vanlig produksjonssykdom, som ser ut til å "komme av en sammenheng fra varierende nivåer av kalsium og salt som kan forvirre fiskens fysiologi i forskjellige stadier, i tillegg til, eller sammen med, utfordring av saltregulering i gjellene (for eksempel fra høy CO₂).

22.2.10 Smoltifisering

Smoltifiseringen er en stor omstilling der fisken går fra å kunne regulere saltbalansen i ferskvann til den motsatte situasjonen i sjøvann. Smoltifisering krever omstrukturering av kroppen, som er en energikrevende prosess. Denne overgangen er derfor en sårbar fase for fisken der appetitt og vekst reduseres. Dersom smolten ikke overføres til sjøvann (>12 ppt), vil den etter hvert reversere prosessen og desmoltifisere, noe som også krever energi.

22.2.11 Sykdomsmotstand

Reparasjon av skader og motstand mot sykdomsframkallende bakterier og virus koster energi. Sykdom er en trussel mot produksjonen, siden det reduserer appetitt og vekst, og øker dødelighet. Høye tettheter av fisk gjør at smitte spres effektivt. Sjøvann inneholder typisk flere millioner bakterier per milliliter, og enda flere virus. Med høy tetthet av fisk i et begrensa vannvolum kommer fisk også i nær kontakt med avføring fra andre individer. Fisken er hele tiden i tett kontakt med vannet mot skinnet, over gjellene og i tarmen. Når disse overflatene er intakte og friske, utgjør de sterke beskyttende barrierer mot sykdom. Slimlag, spesielle cellelag og immunforsvar hindrer angrep fra mikroorganismer. I tillegg vil en frisk fisk være kolonisert av et helt samfunn av bakterier som aktivt kjemper mot inntrengere. En frisk mikrobiota kan beskytte verten, og påvirke immunsystemet og fordøyelsen positivt, blant annet ved å bryte ned eller skille ut aktive stoffer, og ved å skape hard konkurranse som fortrenger uønskede mikrober. Et friskt mikrobefund i tarmen bidrar til at fisken får ut mer energi og næring fra fôret. Fiskeyngelen er steril når den klekkes, men blir raskt kolonisert av mikrober fra miljøet rundt. Koloniseringen bidrar til normal utvikling av fiskens immunsystem. Det tar litt tid for yngelen å utvikle et funksjonelt spesifikt immunsystem, derfor tar det også en stund før man kan oppnå positiv effekt av vaksiner. Fordi immunsystemet er under utvikling, er yngelstadiet spesielt sårbart for sykdom og dødelighet. Ulike friske individer kan ha forskjellig mikrobefund, så det finnes dessverre ikke en enkel oppskrift på hvilke bakteriearter fisken bør være kolonisert av. Det er på den andre siden enklere å lage en liste over patogener de *ikke* bør koloniseres av.

22.2.12 Andre organismer i åpne merder

I åpne merder i sjøen kan fisken komme i kontakt med mange andre typer organismer som kan utfordre produksjonen. Forskjellige predatorer i form av fugl, pattedyr eller fisk kan både stresse, fysisk skade og ta livet av fisk i merda. Kontakt med villfisk kan føre til utveksling av sykdommer og parasitter. Parasitter som lakselus er en belastning for fisken, og et betydelig problem for oppdrett i sjø. Maneter og groe på nøtene kan skape problemer med vanngjennomstrømminga og redusere vannkvaliteten i merda. Oppblomstringer av giftige alger kan ta livet av store mengder fisk på kort tid. Mulighetene for tiltak mot uønskede mikroorganismer er begrensede i åpne merder sammenlignet med lukkede systemer, men valg av lokalitet, god vannstrøm, avstand mellom lokaliteter og brakkløpping kan ha betydning.

Mikroorganismer

Både sjøvann, ferskvann og driftsvann i lukkede systemer inneholder normalt mange forskjellige typer mikroorganismer, som ulike virus, bakterier, arkebakterier, alger, sopp, amøber og flercellede filterspisere. I vannvolum og på overflater med god tilgang på næring kan det raskt vokse opp store mengder mikroorganismer. I vanlig sjøvann er det typisk omtrent 1 million bakterier og 10 millioner virus per milliliter.

De aller fleste mikrobene er enten harmløse eller positive for fisken. Fisken er avhengig av et tett samspill med det mikrobielle miljøet for å oppnå normal utvikling, effektiv fordøyelse og god sykdomsmotstand. Noen få mikroorganismer kan imidlertid skape problemer og sykdom dersom de kommer seg gjennom forsvaret til fisken. Opportunistiske mikrober fra det normale mikrobemiljøet kjennetegnes av at de kan skape problemer *dersom de får muligheten*, mens spesifikke patogener (sykdomsframkallende) mikroorganismer i *høyt nok antall* gir sykdom. Det er ofte de spesifikke patogene mikrobene vi kjenner best, siden de er knyttet til karakteristiske sykdommer, som for eksempel amøbegjellesykdom (amoebic gill disease, AGD) fra den parasittiske amøben *Paramoeba peruans*, infeksjøs lakseanemi (ILA) fra en type akvatisk orthomyxovirus, og furunkulose fra bakterien *Aeromonas salmonicida*. De spesifikke patogene mikrobene er altså likevel avhengige av å komme opp i en viss mengde for å skape sykdom. Det er derfor vanlig å detektere enkelte spesifikke patogener mikrober i oppdrettsmiljøet, uten at det nødvendigvis fører til utbrudd.

Spesifikke sykdommer er en utfordring, men de fleste tilfellene av problemer med mikroorganismer i oppdrett er likevel knyttet til uspesifikke infeksjoner fra opportunistiske bakterier i omgivelsene som benytter seg av muligheten når fisken er skadet eller svekket. En frisk fisk med intakte barrierer og fulle energilagere har god motstandskraft mot å utvikle sykdom. Motstandskraften til fisken reduseres ved lav energistatus og svekket immunsystem. Fysisk skadde barrierer som ødelagt slimlag eller åpne sår gjør det mye enklere for mikrobene å komme seg inn i fisken. Dårlig og varierende vannkvalitet gjør at fisken må bruke mye energi for å opprettholde homeostase (saltbalanse, pH- og gassbalanse), noe som tapper energireservene. Et dårlig mikrobemiljø med mange ugunstige opportunistiske bakterier i omgivelsene til fisken øker sjansen for en negativ utvikling dersom fisken er svekket. En stabil og god normalmikrobiota i omgivelsene til fisken beskytter derimot mot sykdom.

Mikroorganismer i lukkede anlegg

Mens det i åpne merder ikke er mulig å beskytte seg mot mikroorganismene som finnes i omgivelsene, kan en i lukkede anlegg påvirke denne faktoren gjennom forskjellige tiltak. God biosikkerhet med desinfeksjon av inntaksvannet beskytter lukkede anlegg godt mot smitte utenfra. Men selv uten transport av mikrober inn finner man alltid et yrende samfunn av mikrober i lukka systemer under drift. Det skjer fordi selv sterile overflater og desinfisert vann raskt koloniseres av bakterier fra blant annet fisken som settes inn i systemet. Ustabil drift og nyoppstartede lukkede systemer gir i utgangspunktet lav konkurranse mellom bakteriene og rom for oppblomstring av ugunstige bakterier. Tilsvarende som for koloniseringen av hver nyklekt yngel beskrevet over, etableres etter hvert en «husstamme» av mikrober når systemet modner over tid. Som for mikrobeforsømmingen til individuelle friske fisk er det også mange ulike normalttilstander som kan fungere bra i et lukket oppdrettsmiljø, og «husstammen» varierer betraktelig mellom ulike anlegg med god produksjon. Det er dessverre derfor heller ingen enkel oppskrift på hvilke bakteriearter anlegget bør være kolonisert av for å gi fisken et godt bakteriemiljø, og igjen er det enklere å lage en liste over spesifikke patogener mikrober som ikke bør være til stede i omgivelsene til fisken, i det minste ikke i bekymringsfulle mengder. I lukkede systemer er det mulig å påvirke mikrobeforsømmingen ved hjelp av biosikkerhet, vannbehandling og driftsrutiner. Forskning har dokumentert at styring av mikrobemiljøet i positiv retning kan ha stor effekt på produksjonen av fisk, men det er behov for mer kunnskap for å utvikle og mestre dette verktøyet fullt ut.

22.3 FAKTORER SOM MÅ KONTROLLERES FOR GOD PRODUKSJON

Et viktig tiltak for å sikre behovene til fisken under produksjon er å forsøke å kontrollere sentrale faktorer så godt som mulig så disse kan holdes nær det optimale, og innenfor fiskens toleransegrenser. I denne seksjonen skal vi ta for oss noen av de viktigste faktorene som delvis eller helt kan kontrolleres i produksjon av fisk.

22.3.1 Fysiske forhold

Temperatur

Den optimale temperaturen for vekst varierer mellom ulike arter og mellom ulike livsstadier for en art. For eksempel er optimal temperatur for rognutvikling lavere enn for yngelvekst hos atlantisk laks. Det optimale området for vekst hos atlantisk laks i oppdrett antas å være i området 12-13°C for yngel og 13-14°C for litt større fisk. Temperaturen bør holdes stabil, og ved behov endres gradvis med maksimalt en grad om dagen, i anlegg der man kan styre temperaturen.

Vannstrøm

Vannstrøm og utskiftning av vannvolumet er viktig for å få transportert avfallsstoffer (partikler, CO₂ og ammoniakk) effektivt bort fra fiskens omgivelser og for å tilby fisken optimal svømmehastighet for best fiskehelse og vekst. For atlantisk laks er optimal svømmehastighet for fiskehelse og vekst i området rundt 1,5 kroppslengder per sekund. Det betyr også at optimal svømmehastighet, og dermed vannstrøm, øker når fisken vokser. For lav svømmehastighet gir mindre muskelvekst og større muligheter for aggresjon mellom individer, som kan føre til at disse i større grad konkurrerer og sloss med hverandre. For høy svømmehastighet tapper på sin side energilageret og sliter ut fisken, slik at den blir mer sårbar. I lukkede systemer er høy nok vannstrøm også viktig for å forhindre dødsoner, sedimentering og H₂S-produksjon.

Skarpe kanter

Skarpe kanter kan skade slimlag og skinnet til fisken. Fisken må bruke energi for å lege sårene, og vokser dermed litt dårligere. I tillegg vil fysisk skadde barrierer som ødelagt slimlag eller åpne sår gjøre det mye enklere for mikrobene i vannet å komme seg inn i fisken og skape sekundære infeksjoner. Forskning har vist at sårheling hos fisk går bedre i god vannkvalitet.

Kar- og merdutforming

Dybde- og breddeforhold i merd og kar kan ha direkte betydning for fisken, men er spesielt viktig for vannstrøm og vannkvalitet. Hydraulikk og transport av avfallsstoffer er bedre i sirkulære eller åttekantede kar enn firkantede, som har dødsoner og sedimentering i hjørnene. Men dersom sirkulære kar blir for brede i forhold til dybden oppstår det dødsoner med sedimentering i ringer mellom karvegg og senterutløp. Avlange renner med vannstrøm i én retning kan også fungere for å transportere avfallsstoffer raskt til utløp. Ettersom notveggen i en merd er åpen for vannstrøm fra omgivelsene, har utformingen mindre betydning for transport av avfallsstoffer. Samtidig er det viktig å sørge for at strømmen gjennom merdvolumet er stor nok til å oppnå dette gjennom rengjøring av notvegg og valg av lokalitet med gode strømforhold. Det er viktig å ha et godt system for vask av karvegger eller nøter mellom fiskegrupper.

Neddykkede merder er et tiltak som kan benyttes der en installerer et not-tak på merden (typisk på 3-4 m dyp) for å holde fisken dypere og dermed redusere lusepresset som er høyest nær overflaten. Slike tiltak er også gunstig i fjorder der det kan komme flompåvirket ferskvannslag med aluminiumsutfelling ("estuarine blandsoner", se kapittel 1). Siden laks må ha tilgang til luftoverflate for å fylle svømmeblæra vil de få problemer i fullstendig neddykkede merder. For å unngå dette er mange av konseptene for neddykket merdoppdrett utstyrt med en «snorkel», dvs. en lukket passasje mellom merdtaket og overflaten som gir fisken tilgang til overflaten. Noen fiskearter må svømme hele tida og kan trives godt i vide kar eller merder, der det er lett å danne stimer. Andre arter, derimot, for eksempel flyndrer, er «arealfisk» som liker å ligge på en overflate. Andre arter igjen, som rognkjeks, trenger vertikale flater de kan sitte på for å trives. Noen arter, som berggylt, har et sterkt behov for skjul. Ved å tilby berggylta kunstig skjul reduseres aggresjon og stressnivå, og fisken kan bruke mer av energien på vekst.

Lys, farge og lyd

Fargen på veggene i karet kan ha betydning for fisken, ved at den er lettere å se (og ikke kræsje i), eller ved at den sprer lyset på en god måte. Lys er viktig for at fisken skal kunne se føret. I tillegg bruker laks lys og daglengde som et biologisk signal for eksempel for å trigge eller vente med smoltifisering. Selv om mesteparten av belysningen i sjøbasert oppdrett er bestemt av breddegrad, vær og årstid, pleier man å bruke nedsenkede lyskilder i merd-volumet for å unngå kjønnsmodning og styre fiskens svømmedyp, samt stimulere til økt vekst om vinteren som følge av at fisken kan se føret bedre. Plutselige endringer fra lys til mørke eller motsatt kan stresser fisken. Avhengig av art stadium og historikk kan fisk ha ulik atferd knyttet til lys, for eksempel svømme mot en lyskilde, eller rømme fra et plutselig og skremmende, sterkt lys. Tidligere erfaring har også vist at karveggenes farge har betydning for stressnivået hos laks, og at mørke karvegger gir lavere stressnivå enn lyse.

Lyd og vibrasjoner kan stresser fisken, spesielt dersom de oppstår uventet og avviker fra det lydbildet fisken normalt opplever i anlegget (f.eks. during fra fôringsystemer, pumper, båtanløp m.m.). Et plutselig dunk i karveggen kan for eksempel skremme fisken og føre til en stressadferd som å raskt svømme dypere ned og avbryte spising for en stund. Slike stressreaksjoner krever energi fra fisken, og bør derfor unngås.

22.3.2 Biologiske forhold

Fisketetthet

For lav fisketetthet kan føre til muligheten for dominans og aggressivitet som kan gi økt størrelsesfordeling og dårligere trivsel og vekst totalt i fiskegruppa. Fisk som i naturen svømmer i stim vil ikke ha store problemer med å være tett på andre individer, så lenge vannkvaliteten er god og det ikke er rom for aggressiv adferd, som for eksempel ved for lav svømmehastighet. Den optimale tettheten for trivsel og god vekst øker ettersom fisken vokser, siden høy tetthet av stor fisk likevel innebærer langt færre individer. Anbefalt maksimal tetthet ved en forsvarlig vannkvalitet kan derfor være i området 25 kg/m³ for laks i startfôring, 50 kg/m³ for smolt, og opp mot kanskje 90 kg/m³ for slakteklar fisk på 5 kg. I åpne merder er det i Norge satt en grense for fisketetthet på maksimalt 25 kg/m³. Det er ikke satt noen grense for maksimal tetthet i landbaserte anlegg, men det er forutsatt at fisken skal ha god fiskevelferd og forsvarlig vannkvalitet. I dagens oppdrettssystemer er det først og fremst vannkvaliteten som er utfordrende å opprettholde ved høyere fisketetthet enn dette, men selv med optimal vannkvalitet vil det naturligvis også være en øvre grense der fisketettheten i seg selv skaper dårlige vekstvilkår.

Utfôring

Dersom man bruker samme kjente utfôringspunkt kan dominerende individer sørge for å holde andre individer unna, sånn at størrelsesfordelinga i gruppa øker, selv om mengden fôr i utgangspunktet skulle vært nok til alle. For å hindre dette er det best å spre føret godt over hele overflata av oppdrettsvolumet ved fôring. Det er også som regel fornuftig å spre fôringsperiodene ut i tid, ettersom dette også vil redusere konkurranselementer mellom fiskene. Av denne grunn er det i merdbasert oppdrett vanlig å utføre fôringen som en kontinuerlig serie kortere fôringsperioder mens det er dagslys, istedet for kortere intense «måltid» med begrenset varighet. Dette kan også være mer likt laksens naturlige fôringsatferd.

Størrelsesfordeling

En vid størrelsesfordeling i fiskegruppa er et resultat av suboptimale betingelser over tid, der noen individer har fått muligheten til å plage og stresser andre og/eller dominere mat-fatet slik at de selv har vokst godt (alfaindivider), mens andre har vokst dårlig eller ikke i det hele tatt (såkalte taperfisk). En vid størrelsesfordeling er selvforsterkende, siden den store størrelsesforskjellen gjør det lettere og lettere for de største individene å dominere og plage de minste. Dette gjør at størrelsesfordelinga både kan brukes til å gi fiskegruppa gode startbetingelser gjennom sortering ved hver flytting, og som et mål på historikken til fiskegruppa, på hvor bra den har hatt det i produksjonsperioden.

Vasking, håndtering og flytting

Vasking, håving eller andre plutselige aktiviteter i karet eller merda stresser fisken. Fisken oppfatter større ukjente objekter som beveger seg fort som en predator, og blir skremt. Noen ganger er det likevel nødvendig å for eksempel koste bunnen av karet, men da bør man gjøre det med rolige bevegelser og bruke så kort tid som mulig. Det er praktisk nødvendig å flytte fisken fra mindre produksjonsenheter til større med jev-

ne mellomrom for å utnytte produksjonsvolumet og samtidig holde gode tettheter av fisk. Det er også praktisk å flytte og sortere fisken ved ulike stadier over til nye systemer, sånn at man ikke trenger å tilpasse systemet med vannstrøm og siler til større fôr og svømmehastighet og biofilter til ny salinitet, for eksempel. I tillegg er det nødvendig å vaksinere fisken. Når fisken spiser, må den bruke energi på å fordøye fôret. Forut for planlagt håndtering er det derfor vanlig å sulte fisken i noen døgn, slik at det totale energibehovet til fisken holdes på et forsvarlig nivå under håndteringen. I tillegg er det en fordel for vannkvaliteten å flytte sultet fisk som ikke avgir så mye avfall.

Når fisk skal flyttes er det et kompromiss mellom å gjøre det så skånsomt som mulig, men samtidig raskt, sånn at påkjenningen varer så kort som mulig. Det er selvsagt viktig at fisken ikke skades fysisk under flyttinga. For at prosessen skal gå så raskt som mulig også for de siste individene i karet eller merda som tømmes, trenges fisken sammen mot åpningen der man vil den skal gå ut. I sjøbasert oppdrett gjøres trenginga i hovedsak ved å først heve bunnen på oppdrettsnota, og så bruke verktøy som orkastnot til å ytterligere redusere volumet. I kar er den vanligste metoden å tappe ned karet, og så bruke skånsomme fiskepumper, bånd eller skruer til å frakte fisken videre.

Ettersom sjøbaserte produksjonsenheter og -anlegg i det siste har økt i størrelse og dermed totalt antall fisk, har forsvarlig håndtering av fisk vist seg å være et stadig viktigere punkt. Forskningsstudier og hendelser i industrien har vist at konsekvensene av utilstrekkelig fiskehåndtering kan omfatte veldig høyt stressnivå for fisken og noen ganger påfølgende storskala dødelighet. Med flere fisk i hver merd/hvert anlegg øker dermed også den velferdsmessige, etiske og økonomiske kostnaden ved slike hendelser. Årsakene til at dette oppstår kan være at trengeprosessen er for intens, at den varer for lenge, eller en kombinasjon av disse. Et tiltak for å redusere stress under trenging kan være å tilsette rent oksygen til merdvolumet for å unngå hypoksiske forhold. Den uheldige kombinasjonen av hyperoksi (oksygenovermetning) og økt CO₂ (hypercapnia) som da kan oppstå kan imidlertid gi langtidsskader på fisken.

22.3.3 Kjemisk vannkvalitet

Grenseverdier

Toleranseområdet for fisken er avhengig av belastningen fisken har vært utsatt for tidligere og av den totale belastningen den opplever i øyeblikket. Det er derfor uheldig, men dessverre vanlig, å henge seg opp i grenseverdiene for én og én enkeltvariabel, uten å vurdere totalbildet av det fisken opplever. Det er også vanlig å overforenkle grenseverdien til ett enkelt tall og tenke at alt under det tallet er greit, mens alt over er dårlig. I virkeligheten er det ofte en gradvis, men ikke nødvendigvis lineær, økende utfordring det er snakk om når man beveger seg bort fra optimalt område. Grenseverdi er i tillegg et uttrykk som kan bety ulike ting for forskjellige personer. For driftsbiologer er de mest interessante grenseverdiene (eller egentlig «grenseområdene») der fisken begynner å bruke uhensiktsmessig mye energi på å kompensere for denne variabelen. Med andre ord er det altså der **begynnende negativ påvirkning observeres og der man bør sette i verk tiltak** for å rolig eller raskt komme nærmere det optimale området. For hver enkelt variabel er det derfor en øvre og/eller nedre grense der man bør vurdere hva man kan endre i drifta av anlegget for å unngå negative effekter på fiskehelse og vekst. En annen grenseverdi er **grensa for hva fisken tåler før den dør**. Slike kritiske grenseverdier er lite interessante i vanlig drift, men kan være nyttig for å finne ut av årsaken(e) til eventuelle hendelser med massedød av fisk. En generell tommelfingerregel er at nivået der man måler dødelighet for 50% av individene som utsettes for det over en angitt periode på 24 eller 96 timer (Lethal Concentration 50%, LC₅₀) er i størrelsesorden ti ganger høyere enn grenseområdet for målbar negativ påvirkning. Begge disse typene grenser befinner seg lengst fra det optimale området når alt annet er optimalt, fisken er frisk og har topp energistatus. Grensene flytter seg nærmere det optimale området når fisken er svekket på grunn av nylige energikrevende opplevelser og/eller at andre forhold er suboptimale samtidig. Det mest interessante i driftssammenheng er derfor å styre etter optimale områder for vekst, istedenfor absolutte grenseverdier.

Oksygen (O₂)

Optimalt er det 100% oksygenmetning i vannet som omgir fisken, og normalt område for grei drift kan være å ligge fra 85% til 105% oksygenmetning i oppdrettsvolumet der fisken er. Oksygenforbruket varierer blant annet med biomasse, fiskestørrelse, fôrintak, aktivitetsnivå og temperatur. I tillegg til fisken kan det være andre organismer som forbruker

oksygen i oppdrettsvolumet. I lukkede anlegg kan man regne med at bakteriell aktivitet forbruker opptil omtrent en tredjedel av det fisken forbruker, i tillegg til fiskens forbruk. Oksygen måles med sensorer og tilsettes oppdrettsvolumet etter behov. Lavt oksygennivå gjør det vanskeligere for fisken å utnytte energien i fôret og å kvitte seg med CO₂ og ammoniakk over gjellene.

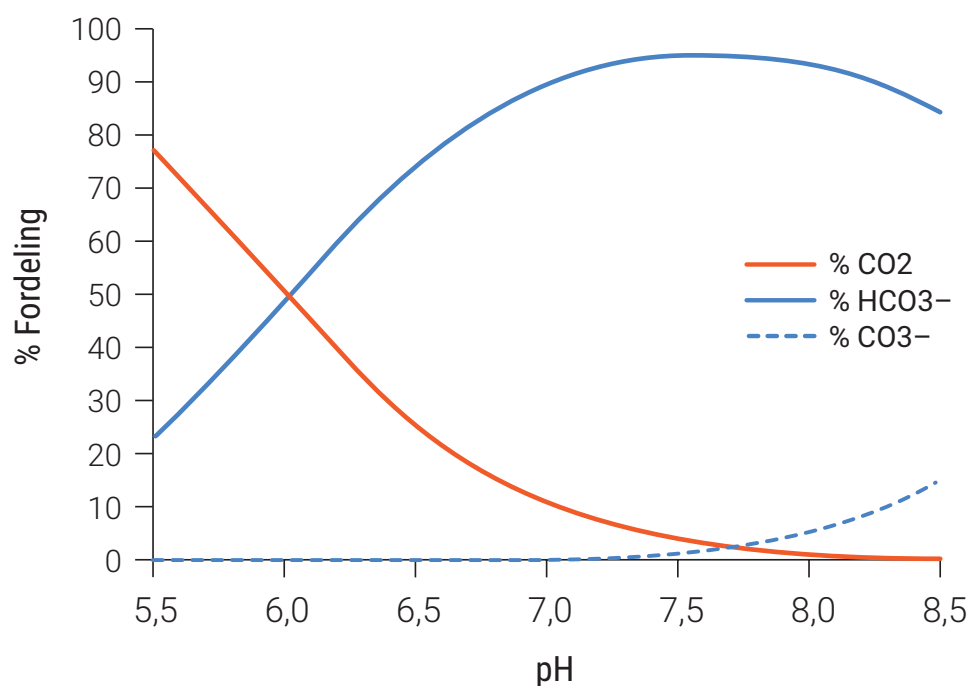
Karbondioksid (CO₂)

Fiskens produksjon av CO₂ henger sammen med oksygenforbruket. Forhøyet CO₂ i vannet som omgir fisken gjør det vanskeligere for fisken å ta opp og transportere oksygen. Forhøyet CO₂-nivå påvirker fiskens toleranse for annen vannkvalitet, som lavt oksygeninnhold og høyt ammoniakknivå i vannet. Det er vist at forhøyet CO₂ i størrelsesorden tilsvarende en dobling av nåværende nivå i havet, eller en tidel av det som er vanlig i oppdrett, allerede sløver sansene til fisken (lukt, hørsel og syn). For høye CO₂-verdier kan gi utslag i redusert vekst og økt dødelighet. Det er vist i flere uavhengige forskningsartikler at kronisk eksponering for forhøyede CO₂-verdier gir ca. 10% vekstreduksjon for laks for hver 10 mg/L økning i området mellom 5 og 40 mg/L CO₂. Vekstreduksjonen er lineær innenfor toleranseområdet til fisken, noe som gjør det attraktivt å jobbe for lave CO₂-nivåer i oppdrettsanlegget. Nedre grense for CO₂ i RAS er likevel høyere enn 5 mg/L på grunn av alkalitetsbehovet til biofilteret som omdanner ammoniakk. I oppdrett er det et kompromiss mellom å ha lavt CO₂-nivå og samtidig fornuftig fisketetthet og vannforbruk/vannrensing i systemet. Hyppige og raske endringer er mer problematiske for fisken enn en gradvis økning. Svært høye doser CO₂ virker bedøvende og kan være dødelige. CO₂ måles med sensorer, eller regnes ut fra kjent pH og alkalitet i systemet for gitt temperatur og salinitet. CO₂ er et avfallsstoff som produseres og bør måles der fisken er.

Tilførsel av CO₂ til vannet reduserer pH og påvirker dermed viktige pH-avhengige likevekter i lukkede anlegg. Nivået av CO₂ i fiskekaret bestemmes av fiskens produksjon, vannutskiftningen i karet og effektiviteten av CO₂-utlufting i systemet. Totalt uorganisk karbon (C_T) i systemet omfatter den giftige CO₂-formen og de ufarlige formene bikarbonat (HCO₃⁻) og karbonat (CO₃²⁻), som til sammen utgjør det pH-avhengige karbonatsystemet. Ved høyere pH foreligger relativt mer av C_T som ugiftig bikarbonat og karbonat, og pH i oppdrettsvannet er derfor viktig for CO₂-nivået fisken opplever.

Figur 22.5 Totalt uorganisk karbon (C_T) i systemet omfatter den giftige CO₂-formen og de ufarlige formene bikarbonat (HCO₃⁻) og karbonat (CO₃²⁻), som til sammen utgjør det pH-avhengige karbonatsystemet. Ved høyere pH foreligger relativt mer av C_T som ugiftig bikarbonat og karbonat, og pH i oppdrettsvannet er derfor viktig for CO₂-nivået fisken opplever.

Fordeling av CO₂, HCO₃⁻ og CO₃²⁻ av totalt uorganisk karbon (C_T) for vann på 13°C og 25 ppt salinitet



Alkalitet

Alkalitet er kapasiteten vannet har til å nøytralisere syrer uten at pH øker. Alkaliteten er mengden bikarbonat (HCO_3^-), karbonat (CO_3^{2-}), borat (B(OH)_4^-), OH^- , fosfat (PO_4^{3-} og HPO_4^{2-}) og silikat (SiO(OH)_3^-), mens H^+ og sulfat (SO_4^-) reduserer alkaliteten:

$$\text{Total alkalitet } A_T = [\text{HCO}_3^-]_T + 2[\text{CO}_3^{2-}]_T + [\text{B(OH)}_4^-]_T + [\text{OH}^-] + 2[\text{PO}_4^{3-}]_T + [\text{HPO}_4^{2-}]_T + [\text{SiO(OH)}_3^-]_T - [\text{H}^+] - [\text{HSO}_4^-]$$

Alkalitet inkluderer altså de ufarlige formene bikarbonat og karbonat i C_T , men *ikke* den giftige CO_2 -formen, og brukes derfor som et mål på hvor stor effekt en *endring* i pH vil ha på mengden giftig CO_2 i omgivelsene til fisken. Alkalinitet kan måles med titrering, eller regnes ut med kjemikalietester i spektrofotometer, eller regnes ut fra målinger av CO_2 og pH for gitt temperatur og salinitet. Alkalitet uttrykkes som ulike enheter kalsiumkarbonatekvivalenter (CaCO_3): $1 \text{ mmol/L} = 1 \text{ meq/L} = 50 \text{ mg/L CaCO}_3$.

Høy alkalitet gjør det lett å holde stabil pH i systemet, men det gjør også at det er vanskelig å holde lave CO_2 -nivå på grunn av høy C_T . Øvre grense for god drift for alkalitet er avhengig av pH og endres gjennom produksjonssyklusen. For å oppnå lav CO_2 og god vekst hos fisken bør alkaliteten være lav i siste del av produksjonssyklusen, når biomassen og CO_2 -produksjonen er høy. Bakteriene i nitrifiserende biofiltere i resirkuleringssystemer er avhengige av en alkalitet (egentlig bikarbonat) over ca. 50 mg/L som CaCO_3 i vannet for å utføre omdanninga av ammoniakk til nitrat effektivt.

Hardhet og kalsium (Ca)

Hardhet er et mål på toverdige kationer, spesielt kalsium (Ca^{2+}) og magnesium (Mg^{2+}). Hardhet uttrykkes i kalsiumkarbonatekvivalenter (CaCO_3), og sier også noe om vannets bufferevne. Kalsium beskytter gjellene mot eventuelle metaller i vannet, men den beskyttende effekten øker ikke vesentlig over 3 mg/L som CaCO_3 . Høyt innhold av kalsium i vannet (i området 400 mg/L som CaCO_3) er et signal til fisken om å smoltifisere, og bør unngås i ferskvannsfasen dersom man ikke ønsker smoltifisering. anbefalt nivå for hardhet før smoltifisering er fra 50 til 70 mg/L som CaCO_3 . Fullt sjøvann (35 ppt) inneholder typisk 420 mg/L kalsium og 1300 mg/L magnesium. Smoltifisert laks er tilpasset hardheten i sjøvann. Hardhet, kalsium og magnesium kan måles i spektrofotometer.

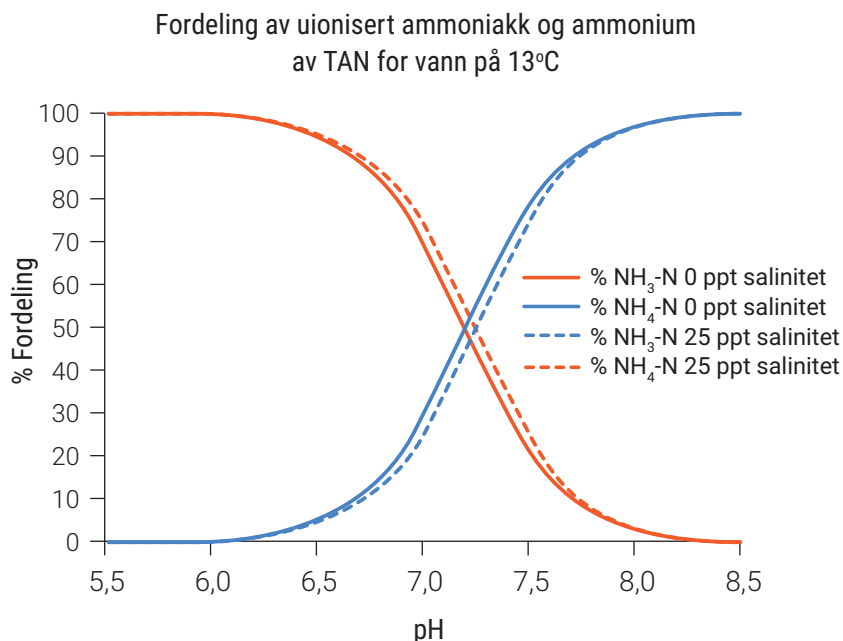
pH

Atlantisk laks kan tåle en pH helt ned mot $6,2$. I sjøen er pH typisk $8-8,3$. I lukka anlegg er optimal pH for fisken avhengig av vannkvaliteten ellers. pH påvirker giftigheten av ammoniakk, CO_2 , H_2S og metaller som aluminium, samt effektiviteten av vannbehandlingskomponenter som biofilter og CO_2 -lufter. Nedre anbefalt grense for å sikre omdanning av ammoniakk til nitrat i biofiltere er pH $7,0$. Giftigheten av ammoniakk for fisken øker med økende pH, samtidig som omdanningen av ammoniakk i biofilteret blir mer effektiv i relevant pH-område for oppdrett. Omvendt øker giftigheten av CO_2 ved synkende pH, samtidig som CO_2 -lufting blir mer effektivt. For lukkede anlegg er derfor optimal pH der den samlede belastningen av ammoniakk og CO_2 er minst mulig på fisken, samtidig som vannbehandlinga fungerer greit. pH bør holdes stabil og endringer bør gjøres sakte og gradvis, og måles med sensor.

Ammoniakk (NH_3)

Høye nivåer av ammoniakk påvirker sentralnervesystemet til fisken og kan føre til akutt forgiftning og død. Optimalt sett bør nivået av uionisert ammoniakk-nitrogen ($\text{NH}_3\text{-N}$) holdes så lavt som mulig. Et vanlig brukt grenseområde for tiltak i drift er $20-25 \text{ } \mu\text{g/L}$. Det er vist at postsmolt kan tilvennes og vokse bra ved en gradvis økning til $32 \text{ } \mu\text{g/L}$ uionisert ammoniakk dersom alt annet er optimalt, men det er også sett økt dødelighet hos laks i forbindelse med brå overgang til de samme nivåene etter håndtering. Mengden av totalammonium-nitrogenet (TAN) som foreligger som henholdsvis giftig uionisert ammoniakk-nitrogen og lite giftig ammonium-nitrogen ($\text{NH}_4\text{-N}$) avhenger av pH, som vist i **figur 22.6**. Konsentrasjonen av uionisert ammoniakk-nitrogen regnes ut fra målt konsentrasjon av TAN for gitt pH, salinitet og temperatur. Ammoniakk er et avfallsstoff som produseres og bør måles der fisken er. I resirkuleringssystemer bør man alltid ha litt ammoniakk i vannet for å holde liv i bakteriene som omdanner ammoniakk til nitrat i biofilteret.

Figur 22.6 Den relative fordelingen av det giftige uionisert ammoniakk-nitrogenet ($\text{NH}_3\text{-N}$) og ammonium-nitrogenet ($\text{NH}_4\text{-N}$) av totalammonium-nitrogenet (TAN) avhenger av pH, salinitet og temperatur.



Nitritt (NO_2^-)

Nitritt er mellomproduktet i den bakterielle omdanninga av ammoniakk til nitrat i biofiltre i resirkuleringsystemer. Ubalanse mellom første og andre trinn i nitrifiseringa gir forhøyede nitrittnivåer i vannet. Nitrittopphopning er ofte forårsaket av ustabile og for lave pH-nivåer for bakteriene i biofilteret. Nitritt (NO_2^-) har samme ladning som, og tas aktivt opp over gjellene i konkurranse med, klorid (Cl^-) i forbindelse med osmoregulering. Høye nivåer av nitritt i vannet gir derfor høye nivåer av nitritt i fisken, mens salt i vannet virker beskyttende ved at fisken i stedet tar opp klorid. Nitritt oksiderer hemoglobinet i blodet til methemoglobin som ikke transporterer oksygen. Ved akutt nitrittforgiftning får fiskens blod brun farge av methemoglobinet, og fisken viser tegn til å kveles selv om det er nok oksygen i vannet. Optimalt nitrittnivå er så lavt som mulig. Vanlig brukte trygge grenser for laks i oppdrett er 0,5 mg/L nitritt-nitrogen i vann med mer enn 0,5 ppt salinitet, og 0,1 mg/L i ferskvann.

Nitrat (NO_3^-)

Nitrat er endeproduktet etter omdanninga av giftig ammoniakk i biofilteret i resirkulerings-systemer, og nivået reguleres enten med spede vannstilsetning (uttyning med nytt inntaksvann) eller denitrifisering (omdanning til nitrogen-gass). I havet er det typisk 1-2 mg/L nitrat-nitrogen ($\text{NO}_3\text{-N}$). For laks er det trygt opp til i hvert fall 100 mg/L nitrat-nitrogen, og kan være trygt også over dette. Nitrat beskytter mot H_2S som produseres i systemet. Optimalt har man derfor et stigende eller stabilt høyt nitratnivå gjennom produksjonssyklusen i lukkede anlegg.

Salinitet

I sjøen er saliniteten typisk mellom 18-35 ppt avhengig av lokalitet. Optimal salinitet for laks er 1-3 ppt i settefiskfasen, og 14-20 ppt i postsmoltfasen. Dersom ferskvannet inneholder mobiliserbart aluminium, bør imidlertid den anbefalte grensen være 1 ppt i settefiskfasen (se kapittel 1). Man bør sannsynligvis unngå 8-11 ppt salinitet for å sikre at postsmolten får et tydelig signal om enten å osmoregulere som i sjøvann eller eventuelt desmoltifisere og regulere som i ferskvann. For biofilteret i resirkuleringsystemer er stabilitet viktig fordi bakteriene er tilpasset en bestemt salinitet. Betydelig endring i salinitet kan derfor gi problemer med omdanning av ammoniakk og nitritt i resirkuleringsystemer. Blanding av sjøvann og ferskvann med metaller kan gi forhold som kan være svært skadelige for fisken (se kapittel 1). Salinitet måles med sensor.

Metaller

Noen metaller som aluminium, jern og kobber kan skape problemer for fisken. Det er som regel lave konsentrasjoner av metall i sjøvann. Konsentrasjonen av metaller i ferskvannskilden kan være høy og variere gjennom året. Ustabile blandsoner kan forekomme når vann med ulik vannkvalitet blandes, spesielt når blandingen fører til endringer i pH, salinitet og/eller redoksnivå. Man bør for eksempel være ekstra oppmerksom når sjøvann blandes med ferskvann eller grunnvann blandes med overflatevann. Endringene i vannkjemien kan forandre formen metallene er på slik at de blir mer giftige for fisken, fra en organisk bundet ikke-labil form til en giftig labil form. Kalsium og organisk materiale (humus) kan binde metaller og frigjøre dem ved blanding med sjøvann eller økning i pH. Ozon kapper opp humusmolekylene og kan derfor også frigi metaller som er bundet til disse.

Giftige blandsoner kan gi høy dødelighet på kort tid. De giftige formene av metallene avsettes på gjellene til fisken og fører til problemer med osmoregulering, pH-regulering og oksygenopptak. Giftigheten er størst under selve blandingen, men begrenset i tid. Inntaksvannet til lukkede anlegg bør behandles hensiktsmessig ettersom hvilke(t) metall(er) som er problemet, for eksempel med silikattilsetning eller metallfelling. Det er svært viktig at inntaksvannet har så lang oppholdstid som mulig i systemet etter blanding med sjøvann, pH-justering og lufting/oksygenering, slik at de kjemiske reaksjonene som skjer i blandsonen er ferdige før vannet når fisken. Stabil og relativt høy pH er bra for å holde giftigheten av metall lav i anlegget.

Aluminium (Al) er akutt giftig for fisk ved lav pH. Den aktive Al^{3+} -formen (labilt aluminium) er mest giftig, og det er anbefalt å holde seg under $5 \mu\text{g/L}$ labilt aluminium i vannet. Selv en liten innblanding av sjøvann (til 1-2 ppt salinitet) kan føre til frigjøring av giftig aluminium fordi økningen i pH gjør at aluminiummolekylene binder seg sammen i lange kjeder. Under dannelsen av kjedene er aluminiumet svært overflateaktivt og bindes lett til gjellene. Etter at aluminiumskjedene er dannet er de mindre reaktive. Behandling av inntaksferskvann med silikatlut før blanding med sjøvann kan redusere problemer med aluminium.

Jern (Fe) kan føre til skader på gjellene, dårlig gjellefunksjon, problemer med yngelutvikling og smoltifisering og akutt dødelighet. Jern er skadelig fra ca. $50 \mu\text{g/L}$, med økt dødelighet fra $300\text{-}500 \mu\text{g/L}$. Ved blanding med sjøvann gir økt pH frigjøring av Fe^{2+} bundet til humus i ferskvannet. Den lite giftige Fe^{2+} -formen går raskt over til giftig Fe^{3+} når vannet oksygeneres. Fe^{3+} binder seg sammen i lange kjeder, og når dette pågår er det svært overflateaktivt og bindes lett til gjellene. Den giftige reaksjonen med utfelling av jern skjer over avgrenset tid. Tilsetning av en lav dose sjøvann (< 1 ppt salinitet) kan brukes for å stabilisere jern etter at eventuell aluminium er behandlet med silikatlut.

H_2S

H_2S skader gjellene og respirasjonssystemet og er svært giftig for fisk. Ved akutt H_2S -forgiftning viser fisken typiske tegn på kvelning selv ved gode oksygenverdier i vannet. For å unngå kroniske negative effekter bør man ligge under $2 \mu\text{g/L}$ i driftsvannet. Økt dødelighet forekommer allerede ved ca. $10 \mu\text{g/L}$. H_2S kan måles med sensor.

H_2S er et avfallsprodukt som dannes av bakterier som kan bruke sulfat (SO_4^{2-}) for å oksidere organisk materiale. Dersom det er tilgjengelig bruker bakteriene først oksygen, og deretter nitrat, som oksidasjonsmiddel. I vann som blir stående stille brukes oksygenet og nitraten raskt opp av bakteriene før de går over til å oksidere det organiske materialet med sulfat. I tynn biofilm brukes først oksygenet, og deretter nitraten, opp på vei innover, og det innerste laget produserer H_2S som går tilbake ut i vannet. På samme måte produseres H_2S fra råtnende dødfisk og slam om det blir liggende i systemet. Inspeksjon av sårbare områder som bunn, sumper og rør bør utføres mellom hver produksjonssyklus for å identifisere slamopphopninger, tynn biofilm eller karakteristiske svarte flekker som tyder på H_2S -dannelse i systemet.

H_2S har en karakteristisk lukt, men er svært løselig i vann, så det er normalt ikke mulig å lukte H_2S selv ved nivåer som gir akutt massedød av fisk i anlegget. Den høye løseligheten i vann gjør også at H_2S er mye vanskeligere å luften ut enn CO_2 . Sjøvann inneholder ca. 2700 mg/L sulfat, som er omtrent tusen ganger mer enn det man typisk finner i ferskvann. Det produseres derfor mer H_2S raskere i anlegg med sjøvann, men H_2S også en risiko i ferskvannssystemer fordi organisk materiale inneholder en del svovelforbindelser som kan dannes til sulfat.

Oksidasjonsmidler som ozon, hydrogenperoksid, og i mindre grad oksygen og nitrat, oksiderer H_2S tilbake til sulfat. Oksygen og nitrat beskytter i tillegg mot H_2S -produksjon ved at de foretrekkes framfor sulfat av bakteriene. Giftigheten av H_2S reduseres med økende pH.

Redokspotensiale

Redokspotensialet er et mål på hvor oksidativt miljøet er i vannet, og sier noe om vannkvaliteten. Redokspotensialet kan brukes for å regulere doseringene av oksidasjonsmidler som ozon, for å måle at det skjer desinfeksjon og for å måle hvilke prosesser som skjer, for eksempel nitrifisering eller H_2S -produksjon i et denitrifiseringsfilter. Redokspotensialet måles med sensorer. Et godt redoksnivå for fisken er stabilt i området 250-320 millivolt (mV). For høye redoksnivå, for eksempel ozonering til 400 mV, er skadelig for fisken. Lave redoksnivå (< 180 mV) er et tegn på generelt dårlig vannkvalitet.

Partikler og organisk materiale

Optimalt er det lav turbiditet og lite partikler i vannet. En vanlig brukt grenseverdi er 10 mg/L totalt suspendert stoff (TSS). For mye partikler i vannet gir dårlig vannkvalitet med flere bakterier, høyere produksjon av CO_2 og ammoniakk, høyere oksygenforbruk, mindre effektiv CO_2 -lufting, mindre effektiv ammoniakkomdanning, fare for nitritoppbygging, risiko for H_2S -produksjon og irritasjon av gjellene. Korrekt fôring, fôrkvalitet og effektiv vannutskiftning er viktig for å unngå mye partikler i vannet. For lukka systemer er god hydraulikk og dimensjonering av rør og vannbehandling viktig for å oppnå god partikkelfjerning. Driftspersonell bør sjekke vannet daglig, og gjellene til fisken jevnlig.

Totalgassmetning

Totalgasstrykket er summen av trykket av alle de løste gassene i vannvolumet, og er 100% i et vannvolum som er i likevekt med atmosfæren ved atmosfærisk trykk ved en gitt temperatur. Totalgasstrykk større enn 100% kan skade fisken. Gassboblesyke kommer av at gassovermetning i vannet gir overmetning i kroppen til fisken der gassbobler dannes i vev og blodårer når trykket synker på grunn av friksjon i blodårene. Det er spesielt nitrogen-gassovermetning som er problematisk for fisken, siden den ikke har noe system for å kvitte seg med eller bruke nitrogengass. For oksygen tåler fisken lave nivå med overmetning (101-105% oksygenmetning) fordi oksygenet raskt brukes. Gassovermetning dannes når et vannvolum varmes opp, når gass eller luft tilsettes under trykk, eller når vann pumpes fra dypet. Gassovermetning fjernes effektivt fra vannet med vakuumluftere. Totalgassmetning måles med en totalgassmåler.

Kjemikalier og desinfeksjonsmidler

Det kan i mange tilfeller være nyttig og nødvendig å bruke ulike kjemikalier for å behandle fisken eller vannet eller for å desinfisere eller vaske materialer i miljøet til fisken. Det er viktig å vurdere hva de ulike tilsetningene gjør med fisken, det mikrobielle miljøet på og rundt fisken, bakteriene i biofilteret som trengs for å omdanne ammoniakk og eventuelt andre organismer som kan påvirkes av utslipp. Noen kjemikalier kan være direkte skadelige eller giftige for fisken, som såpe eller klor. Antibiotika og antilusemidler påvirker det mikrobielle miljøet og kommer med fare for utvikling av resistens.

Løsninger for å håndtere andre organismer

Teknologi i åpne merder

Merdene som brukes i sjøbasert oppdrett er i hovedsak designet for å holde fisken på plass i anlegget, og samtidig legge til rette for et godt produksjonsmiljø. For å oppfylle begge disse funksjonene består merdveggen av notlin med en masketørrelse og trådtykkelse som hindrer fisken fra å rømme, samtidig som den tillater tilstrekkelig vannutveksling med omgivelsene til å sørge for tilførsel av oksygenert vann og transport av avfall bort fra anlegget. Merdveggen hindrer også i stor grad andre fisk og pattedyr i å angripe eller på andre måter påvirke fisken, mens fugler hindres tilgang gjennom såkalte fuglenett; notstykker festet til gangbane/rekkestøtte som spenner over hele merdarealet. Det er betydelig vanskeligere å skjerme fisken mot mindre organismer som parasitter/Lus, alger og andre mikroorganismer i sjøbaserte anlegg. Disse er for små til å fanges opp av notveggen, og vil derfor uten ytterligere barrierer, flyte fritt inn i anlegget dersom de slippes ut oppstrøms fra en merd, eller transporteres til denne via havstrømninger. En annen utfordring det kan være vanskelig å skjerme seg mot er manetoppblomstringer. Det har vært tilfeller der store mengder maneter har tettet igjen notmasker i merdbaserte anlegg, noe som til sist resulterte i masseud blant fisken.

Såkalte luseskjørt er et mye brukt tiltak for å redusere eksponering for lus. Dette er som regel en helt tett membran som spennes rundt de øverste (5-10 m) vannlagene og har til hensikt å hindre vannet på dette dypet (som er der forekomsten av larver og lus på andre stadier er størst) fra å komme inn i merden. Tanken er da at den nødvendige sirkulasjonen i merden skal dekkes av vann som kommer inn fra dypere lag og som har betydelig færre lus. Dette tiltaket har vist seg effektivt mot lus, men kan også medføre en viss risiko for hypoksi og uheldig vannkvalitet som følge av redusert sirkulasjon. Skjørt og andre tiltak der fisken stimuleres til å oppholde seg innenfor volum avgrenset fra omgivelsene kan også utvides ved at volumet fylles med ferskvann. Slik ferskvannsbehandling kan tilføre en viss terapeutisk effekt i at lus som allerede har festet seg til fisk faller av som følge av ferskvannet. Utover dette og helt lukkede anlegg finnes det ikke mange tiltak for å sikre seg mot mikroorganismer i merdbasert oppdrett. Det er derfor spesielt viktig å sørge for god vaksineringsgrad i sjøbaserte anlegg.

Teknologi i lukka systemer

Lukka systemer gir mulighet for behandling av inntaksvann. Spesielt er resirkulerings-systemer godt egna for biosikkerhet, fordi det er relativt lite inntaksvann som må kontrolleres. Minimum er at andre større organismer i vannet stoppes av siler inn til anlegget. Videre er det vanlig å ha ett eller flere filtreringstrinn som tar bort partikler og mindre organismer, og ett eller flere trinn der man desinfiserer vannet før det går inn i anlegget. Jo flere ulike barrierer med rensing og desinfeksjon av inntaksvannet man har, jo mindre er risikoen for at en smittsom organisme skal klare å ta seg inn i anlegget i en tilstand der den klarer å formere og etablere seg. Effektiviteten av desinfeksjon kommer an på type teknologi, organisme og vannkvalitet. Filtrering av partikler bidrar til at påfølgende desinfeksjonstrinn blir mer effektive. Nano- og ultramembranfiltrering er både partikkelfjerning og desinfeksjon i ett, siden mikroorganismene filtreres ut fra vannet som partikler. UV-behandling er et desinfeksjonstrinn som er vanlig i både sjøvann og ferskvann. Ozonering over 700 mV kan brukes til å desinfisere ferskvann, ofte etterfulgt av UV-behandling for å uskadeliggjøre restozon. Høydoseozonering bør ikke brukes for å desinfisere sjøvann til fisk i lukkede anlegg, siden det danner restprodukter som bromat som er bestandig, giftig og kreftfremkallende. Derimot er sirkulasjon av høyozonert sjøvann et effektivt verktøy for å desinfisere overflater i lukkede anlegg uten fisk.

Tak, vegger og dører beskytter mot at dyr og fugler kommer inn i anlegget. I bygg kan man også filtrere inntaksluft om det er ønskelig. For å sikre at smitte ikke kommer inn med rogn desinfiseres den på vei inn til klekkeriet. Driftspersonell og besøkende må gjennom sluser der man vasker og desinfiserer hendene og bytter sko og ytterklær. Utstyr tilhører hver smittesone, og vaskes og desinfiseres dersom det må flyttes mellom avdelinger.

Selv om biosikkerheten inn i anlegget er god, er det alltid et yrende mikrobieliv i anlegget under drift. Mikrobemiljøet er viktig for fiskehelsen i alle systemer, og i resirkulerings-systemer er de i tillegg nødvendige for å opprettholde trygg vannkvalitet gjennom å om-danne ammoniakk i biofilteret. Resirkuleringsystemer har en åpenbar økt risiko for smitte mellom produksjonstanker koblet til samme vannsystem, men gir samtidig flere fordeler innen mikrobiell kontroll. For det første gir redusert mengde inntaksvann gode forutsetninger for å opprettholde svært høy biosikkerhet. For det andre skaper det store overflatearealet med biofilm, den stabile organiske belastningen og den lange oppholdstida for vannet i systemet sterk konkurranse mellom bakteriene. Dette selekterer for en stabil og konkurransedyktig bakteriepopulasjon med lite rom for opportunister. For det tredje betyr muligheten for å tilby konstante gunstige miljøforhold at fisken i teorien kan oppnå best vekst, overlevelse og sykdomsresistens i resirkuleringsystemer, dersom teknologi og drift mestres til fulle.

22.4 FISKEN I FANGENSKAP

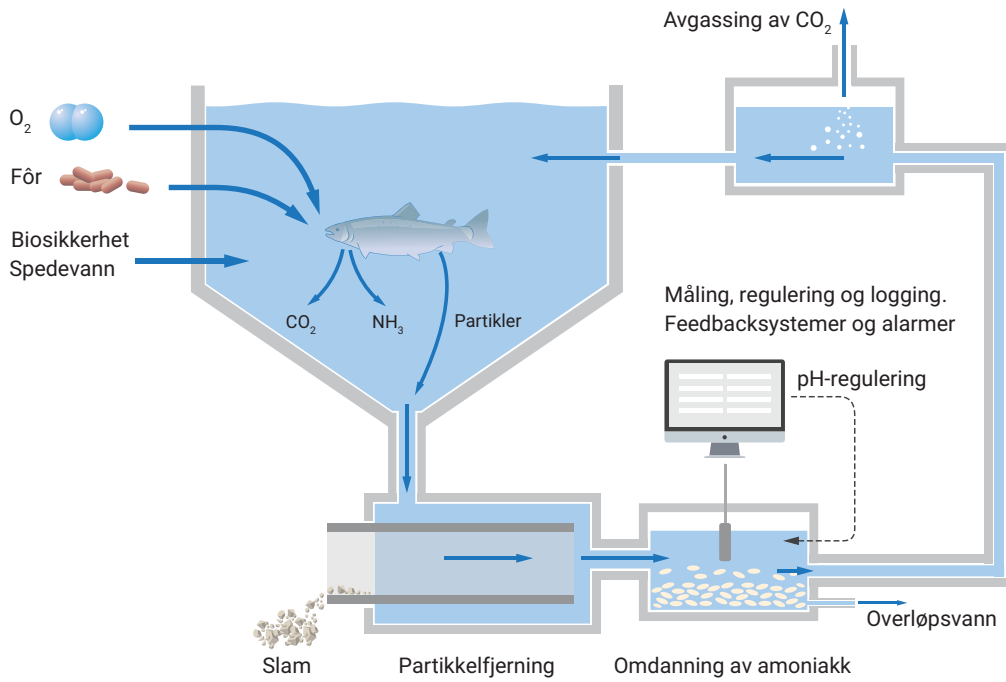
I naturen vil fisk svømme bort fra et område med dårlig vannkvalitet. I fangenskap har ikke fisken denne muligheten, og det er derfor oppdretters ansvar å sikre fisken gode forhold. For best overlevelse og vekst i produksjon er det miljøet fisken faktisk opplever som betyr noe, ikke hvilken teknologi som brukes for å tilby det. Åpne systemer avhenger av naturen på lokaliteten, mens lukka systemer avhenger mer av teknologi og oppdretter, på godt og vondt. Uansett teknologi avhenger produksjonen av at fisken får tilgang på oksygen og fôr og et levelig fysisk, kjemisk og mikrobielt miljø der avfallsstoffene som produseres ikke hoper seg opp til problematiske nivåer.

I åpne merder frakter vannstrømmen oksygen til, og avfall bort fra fisken. I lukka anlegg, derimot, oppkonsentreres avfallsstoffene i vannet rundt fisken, og teknologi må brukes for å fjerne det ved å pumpe nok nytt eller rensset gjenbrukt vann gjennom anlegget, så avfallsstoffene tynnes ut. I åpne systemer er det vanskelig å hindre negative effekter fra varierende temperatur, lakselus og giftige algeoppblomstringer. I lukka anlegg har man bedre mulighet til å beskytte fisken mot variasjoner og trusler fra naturen. I åpne systemer hjelper naturen stort sett med å holde forholdene innenfor toleransegrensene til fisken og endringer skjer som regel over tid, mens det kan gå veldig raskt veldig galt i lukka systemer dersom teknologien eller drifta svikter. Til gjengjeld har man større mulighet for å styre miljøet og få til gode vekstforhold for fisken uavhengig av årstidsvariasjoner og værforhold i lukka anlegg, og da spesielt i resirkuleringsystemer (RAS). I kategoriseringen av natur- og teknologiavhengighet er gjennomstrømssystemer en slags mellomting: den store mengden nytt vann gjør dem betydelig påvirket av naturen, men i mindre grad enn åpne merder, samtidig som de er avhengig av teknologi, men i mindre grad enn RAS.

Sammenligning av mulighetene og begrensningene i de ulike systemene er mer interessant enn å sette dem direkte opp mot hverandre. Med et godt designet RAS kan oppdretteren kontrollere miljøet i større grad enn i gjennomstrømningssystemer, men man får ikke automatisk optimale forhold selv om man har et RAS. Ikke alle RAS er like eller driftes likt, og ikke alle gjennomstrømningssystemer er like eller driftes likt, tvert imot. Et godt designet og drevet gjennomstrømningssystem kan produsere like fin fisk som et godt RAS, eller bedre, mens et dårlig system er dårlig for fisken uansett teknologi.

Tradisjonelt har det vært et tydelig skille mellom sjøanlegg og landbaserte anlegg, blant annet fordi mange av teknologiutfordringene som må løses er så ulike. I sjøen må anleggene tåle bevegelser og påkjenning fra bølger og vær, mens på land er arealeffektivitet og løftehøyde på vannet viktig. Det er i tillegg hensiktsmessig å kategorisere oppdrettsteknologi etter grad av lukkethet og gjenbruk, siden systemer med samme grad av gjenbruk har mange felles utfordringer og løsninger som er uavhengige av plassering.

Når man snakker om grad av gjenbruk eller resirkulering i oppdrettssystemer dreier det seg typisk kun om vannet, og ikke næringsstoffer. Alle lukka anlegg må frakte nytt vann gjennom systemet for å fortynne bort avfallsstoffene som produseres. De enkleste (semi-) lukka systemene er gjennomstrømssystemer på land, og tilsvarende lukka merd i sjø, der bare nytt vann går inn i karet eller merda og det brukte vannet slippes ut uten at noe gjenbrukes. I gjenbrukssystemer blir en del av vannet rensset for partikler og luftet for CO₂ før det gjenbrukes. I RAS gjenbrukes så mye av vannet at man i tillegg må ha pH-regulering og biofiltre for å omdanne ammoniakk til nitrat. I RAS kontrolleres nitratnivået ved hjelp av fortynning med spede vann (nytt inntaksvann til systemet). I Zero Exchange Systems (ZES) reduseres bruken av spede vann ytterligere ved at nitrat fjernes med denitrifisering til nitrogen gass som slippes ut i luft. Jo høyere grad av gjenbruk, jo flere renssetrinn er altså nødvendige i lukka anlegg. Samtidig reduseres avhengigheten av naturen på lokaliteten, mens teknologiavhengigheten og muligheten for kontroll øker. Avhengigheten av flere kompliserte renssetrinn øker både risikoen for og alvorlighetsgraden av teknisk svikt i systemet. **Figur 22.7** viser prinsippet for håndtering av avfall i et RAS. **Figur 22.8** viser den praktiske utformingen av et moderne RAS.



Figur 22.7. Oversikt over vannrensing i et RAS. Fisken produserer avføring, ammonium fra deaminering av proteiner, og CO_2 fra respirasjonen. Partikler fjernes (trommelfilter eller lignende) før vannet går inn i et biofilter som omdanner ammoniakk til nitrit og nitrat. Etter pH-justering avgasses CO_2 samtidig som oksygen tilsettes vannet (lufting, innløsning av O_2) før vannet går tilbake til fiskekarene. Noe vann skiftes også ut og erstattes med rensed og desinfisert spedevann.



Figur 22.8. Et moderne RAS med lokalisering av kar, biofilter og renseutstyr (med tillatelse fra Sterner AS).

Oppsamling og gjenbruk av næringsstoffer vil bli viktigere framover. Både for å unngå lokal eutrofiering i sårbare resipienter, men aller mest for å ta vare på begrensede ressurser som kan gjenbrukes til fôr og gjødsel. Fôrindustrien trenger erstatning for mindre bærekraftige ingredienser. Mer enn 1,4% av CO₂-utslippene og 1% av energiproduksjonen i verden går med til å binde nitrogen gass fra luften for å lage gjødsel. Samtidig er fosfor en begrenset ressurs i verden. Utvinning av fosfor fra gruver er også energikrevende. Omtrent to tredjedeler av karbonet, nitrogenet og fosforet i fôret ender ikke i fiskebiomassen, men slippes ut i produksjonsvannet. Karbonet som ikke blir til biomasse, ender som CO₂ og organisk slam. Fisken slipper ut omtrent 0,25 kg avføring per kg fôr (begge tørrvekt). Omtrent 75% av nitrogenet som slippes ut av fisken ender som totalammoniakk-nitrogen (TAN) i oppdrettsvannet, resten ender i slammet. I resirkuleringsystemer omdannes TAN til nitrat i biofiltre og slippes ut av systemet i enten vann (RAS) eller som nitrogen gass til luft (ZES). Omtrent 25% av fosforet som slippes ut av fisken ender som fostfat i vannet, resten ender i slammet. Slam kan avvannes og brukes til mat for filterspisere, gjødsel eller biogass. De løste næringsstoffene kan brukes til å dyrke planter og alger, men det må skje lokalt for å unngå å transportere alt vannet. Det finnes kommersielle akvaponisystemer der vannet fra oppdrett renses av planter som vokser på næringsstoffene. Ofte tar plantedelen av slike systemer 7-10 ganger arealet av oppdrettsdelen. Et annet poeng er at de fleste planter ikke tåler salt, ikke en gang 1 ppt. Alger kan dyrkes på flere saliniteter, og er et godt alternativ i marine systemer.

Det er enklere å gjenbruke de konsentrerte avfallsstrømmer fra systemer med høy grad av gjenbruk enn de veldig fortynnede strømmene fra gjennomstrømsanlegg. Gjenbruk av næringsstoffer er også mulig i åpne systemer, ved å samle opp slam under merda eller dyrke andre organismer i nærheten av anlegget, men på grunn av vannstrømmene fortynnes avfallsstrømmene raskt ut, og det er vanskelig å få tak i mer enn noen få prosent av næringen på denne måten.

Det meste av dagens produksjonsvolum i norsk havbruk skjer i konvensjonelle anlegg med åpne merder på kystnære skjerma lokaliteter. Ettersom næringa har vokst, har tilgangen til passende lokaliteter for denne produksjonsformen blitt stadig mindre. For å muliggjøre fremtidig vekst har industrien derfor begynt å undersøke alternative driftsformer. En av disse er å flytte produksjonen lenger fra land for å blant annet unngå f.eks. høyt lusepress, patogener og lav oksygennivå langs kysten, samt øke avstanden mellom anlegg og lakselver, og dermed potensielt redusere hvor mye produksjonen påvirker villfisk. En annen viktig trend går mot mer biologisk lukka anlegg. I framtida kan vi få anlegg som er helt avstengt fra naturen, der ingen mikroorganismer eller genetisk materiale utveksles mellom anlegget og omgivelsene, og med maksimal gjenbruk av både vann og næringsstoffer som brukes til å produsere verdifulle fôringredienser, gjødsel og energi. Dette vil muliggjøre bruk av lokaliteter som har for ugunstige kjemiske og/eller mikrobiologiske forhold for produksjon med dagens systemer.

Tabell 22.1 kategorisering av oppdrettsteknologi etter plassering og grad av gjenbruk av vann og avfall.

	Plassering		Gjenbruk		
	Sjø	Land	Partikulært avfall	Vann	Løst avfall
Åpen merd	X		(X)		(X)
Lukka merd/Gjennomstrømsanlegg	X	X	X		
Gjenbrukssystem	X	X	X	X	
RAS	X	X	X	X	
Zero exchange system	X	X	X	X	
Akvaponisystemer	X	X	X	X	X

22.4.1 Sjøbaserte anlegg

Konvensjonelle sjøbaserte anlegg består i dag typisk av et antall (10-15) merder, en fôrflåte med tilhørende fôringssystemer som er etablert i hver merd, og et fortøyningssystem. Merdene består som regel av flytende sirkulære plastringer utstyrt med en gangbane, som oppdretter kan bruke som plattform for å gjennomføre operasjoner/inspeksjon av merden, en notpose som henger ned fra flytingen, og et nedloddingsystem som skal spenne ut notposen. Merdene kan måle en omkrets på 157 m eller mer og være inntil 50 m dype, noe som gjør deres indre volum flere titalls tusen kubikkmeter. Hver merd kan etter lovgivingen inneholde maksimalt 25 kg biomasse m^{-3} eller 200.000 individfisk. Fôrflåten er en flytende konstruksjon av enten stål eller betong som inneholder fôrsiloer, et sentralfôringssystem som gjennom velgere kan sende fôr via individuelle slanger til hver enkelt merd, og verksted/oppholdsareal for arbeiderne på anlegget. Fortøyningssystemet på sjøbaserte oppdrettsanlegg kalles ofte rammefortøyning siden denne består av et rammeverk av tau eller kabler som er designet slik at alle merdene og fôrflaten kan festes til denne på en strukturert måte som sikrer tilstrekkelig avstand mellom enkeltmerder. Rammefortøyningen er som regel festet til havbunnen og/eller bergvegger i nærheten for å sikre at anlegget holder seg på plass, og er riktig orientert i forhold til strømrretningen.

Sjøbaserte anlegg har tradisjonelt blitt etablert på innaskjærs lokaliteter der skjær og holmer skjermer for det verste uværet. I tillegg til å finne en passende lokalitet må også oppdretter skaffe produksjonstillatelser som gir lov til å produsere en viss mengde biomasse. Ofte vil en oppdretter samle flere slike tillatelser på en lokalitet for å få en tilstrekkelig høy maksimal tillatt biomasse (MTB) til at driften blir lønnsom. Det er imidlertid ikke fritt fram å etablere anlegg på sjøbaserte lokaliteter ettersom det må sikres at forholdene muliggjør effektiv produksjon samtidig som miljøpåvirkningen til produksjonen ikke blir for stor lokalt og regionalt. Sjøbasert havbruk konkurrerer også om kystareal med annen industri som fiskeri, turisme og andre næringsinteresser. Som nevnt tidligere vil fremtidig vekst innenfor sjøbasert oppdrett sannsynligvis komme gjennom økt produksjon til havs eller i lukka anlegg.

Før en lokalitet blir etablert, er det viktig å skaffe seg et overblikk over hvordan forholdene i det aktuelle området varierer i både tid og rom for å kunne vurdere om grunnlaget for bærekraftig drift er til stede. Dette gjelder spesielt fysiske forhold som bølge- og strømnivå, som er viktig for å dimensjonere anlegget for å unngå havari og rømming, og som påvirker andre sider ved produksjonen. Strømforholdene er eksempelvis viktige for fiskens trivsel og vannutskiftningen på lokaliteten.

Bølgeforldene kan også ha viktige effekter på produksjonen. Siden anlegg til sjøs er flytende konstruksjoner, vil de i stor grad følge bølgebevegelsene på lokaliteten. For store bølger kan skape så mye bevegelse i anlegget at arbeidsforholdene på lokaliteten blir vanskelige. I ytterste konsekvens kan krevende bølgeforld gjøre det umulig eller vanskelig på å få gjennomført kompliserte og krevende operasjoner som involverer fiskehåndtering på en trygg måte. Dette har vært en konkret årsak til at norske oppdrettselskap har valgt å forlate enkelte lokaliteter som ellers har gode forhold for produksjon av driftshensyn.

22.4.2 Landbaserte anlegg

Fordelene med landbaserte anlegg er først og fremst at man slipper belastningene med bølger og vannstrøm og at en del infrastruktur er lettere tilgjengelig på land. Til gjengjeld tar landbaserte anlegg opp areal, ofte i større konkurranse med andre aktiviteter enn for sjøbaserte anlegg. Konstruksjoner på land er i tillegg ofte mer permanente enn tilsvarende i sjø. Regulering fra myndighetene har mye å si for lønnsomheten av å satse på land eller i sjø. For eksempel er produksjonstillatelser på land gratis, mens tilsvarende tillatelser i sjø er veldig kostbare, noe som gir et sterkt insentiv for å bygge landbaserte anlegg. En annen stor fordel sammenlignet med sjøanlegg er muligheten for å legge de landbaserte anleggene nært store markeder. Landbaserte anlegg trenger noe vann og derfor en vannkilde, og vannet må pumpes inn i og rundt i anlegget. For å benytte seg av muligheten for temperaturkontroll må vannet kjøles og varmes, noe som sammen med pumper krever energi. I tillegg krever vannbehandlingen som trengs ved resirkulering av vannet energi. Fordi landareal er verdifullt, er det spesielt viktig å utnytte oppdrettsvolumet på land godt. Det betyr at god produksjonsplanlegging, god dimensjonering, høye tettheter, minst mulig tid med tomme kar og optimale vekstforhold er svært viktig for lønnsomheten i landbaserte anlegg.

22.4.3 Åpen merd

Strømforholdene i åpne merder er prisgitt lokalitetens egenskaper og vil dermed i stor grad være bestemt ved etablering av anlegget og vanskelig å justere i etterkant. Siden strømforholdene har stor betydning for både fisken (dens evne til å opprettholde svømmehastigheter innenfor de optimale grenseverdiene for vekst og velferd) og vannutskiftning (transport av oksygen fra omgivelsene inn i merdvolumet og transport av avfallsstoffer ut fra merdvolumet) er det derfor viktig at slike forhold tas høyde for i vurdering og planlegging av nye lokaliteter. En annen viktig faktor å vurdere ved lokalitetsvalg er temperaturen i området og dennes variasjon i både tid og rom (spesielt med dybden). Det finnes ingen mulighet for oppdrettere å justere vanntemperaturen i åpne merder, og det er derfor viktig å søke mot å sikre tilstrekkelig gode temperaturforhold allerede ved lokalitetsetablering.

Fiskens eksponering ovenfor viktige biologiske faktorer som lus, alger, maneter, villfisk og patogener er også utenfor oppdretters kontroll i åpen merdoppdrett. Av disse har spesielt lus fått mye fokus de siste årene, både fordi luseutbrudd i seg selv er negative for fiskens velferd, og fordi behandlingsmetodene som brukes i dag krever håndtering av fisken, noe som kan være svært krevende for fiskens velferd og stressnivå. De siste tiåra har det derfor blitt utviklet forskjellige preventive tiltak som har til hensikt å motvirke lusepåslag. Noen av de viktigste elementene på dette området er bruk av luseskjørt og nedsenkbare merder for å skjerme fisken fra de øvre vannmassene der det antas at det er mest lus. Slike tiltak kan også hjelpe mot andre biologiske faktorer som utbrudd av alger og maneter som opptrer mer sjelden, men like fullt kan være skadelig for fisken. Andre metoder som teknologiske verktøy for å detektere og telle, og i noen tilfeller fjerne lus, brukes også i stadig større grad for å ha bedre oversikt over historikken for lusepåslag ved lokaliteten.

Patogener i form av mikroorganismer vil alltid eksistere i sjøen på ulike konsentrasjonsnivå. Når konsentrasjonen av disse øker utover det fisken har kapasitet til å bekjempe gjennom egen fysiologi, kan sykdomsutbrudd som kan gi potensielt alvorlige konsekvenser for fiskens velferd, vekst og overlevelse oppstå. Dette har alltid vært en utfordring for sjøbasert oppdrett, og har derfor vært et viktig fokus for forskning og utvikling siden den norske oppdrettsnæringa ble etablert. I sjøen er det vanskelig å unngå at fisken blir eksponert for patogener, og det finnes få operative tiltak utover å flytte fisken til andre merder internt på anlegget, noe som sjelden vil ha stor betydning dersom en opplever sykdomsutbrudd. Det viktigste tiltaket en har innen bekjempning av sykdomsutbrudd i åpen merdoppdrett er derfor vaksiner. Siden dette er såpass viktig, utvikler næringa stadig mer effektive vaksiner mot de sykdommene vi har i norske farvann, og de som kommer utenfra. Dette har vist seg veldig effektivt, og har også resultert i at norsk fiskeoppdrett er en av husdyrnæringene i dag som bruker klart minst antibiotika per kg protein produsert. Selv om villfisk i seg selv ikke har betydelig effekt på fisken i merdene, kan disse ses sammen med forekomsten av patogener når det gjelder utfordringer på sjøbaserte anlegg, ettersom villfisk kan fungere som sykdomsvektorer mellom forskjellige anlegg og mellom anlegg og villfiskbestandene. Siden villfisk tiltrekkes av fôringsaktiviteten, og til forskjell fra lus og patogener er i stand til å flytte seg vilkårlig rundt på utsiden av merden, er det vanskeligere å skjerme seg mot denne potensielle kilden til smitte. Det er imidlertid verdt å merke seg at det meste av fisken som samler seg rundt norske lakseanlegg ofte ikke er nært beslektet med laks og dermed trolig har en svakere effekt som smittevektorer.

På lik linje med fysiske og biologiske forhold er også vannkjemien i åpne merder i stor grad bestemt av omgivelsesforholdene og fiskens innvirkning på merdmiljøet. Her er tilførsel av oksygen og fjerning av CO₂ og andre avfallsstoffer til og fra merdvolumet spesielt viktig. Utover å sikre tilstrekkelig sirkulasjon på lokaliteten finnes det også aktive tiltak som tidvis kan brukes til å forbedre det kjemiske vannmiljøet. Eksempelvis finnes det ulike løsninger som søker å øke O₂-metningen i merden ved å boble oksygen fra enheter plassert dypt i merdvolumet. Slike systemer kan være spesielt aktuelle å bruke under fiskehåndteringsoperasjoner som inkluderer trenging, ettersom fisken da trenges sammen i høyere konsentrasjoner enn normalt. I slike situasjoner kan hypoksiske forhold oppstå, og medføre alvorlige helsemessige konsekvenser for fisken som kan resultere i dødelighet.

På generell basis finnes det også andre teknologiske tiltak oppdretter kan bruke for å styre forholdene i merden til det bedre for fisken. Her er fôringsstrategi og -metode særs viktig, siden fôr både er den viktigste innsatsfaktoren fra oppdretter og fordi det er en veldig sterk drivkraft for atferden hos laks. Ved å justere utfôringssted, -tid og -mengde kan oppdretter

enten påvirke hvor fisken svømmer, eller unngå å føre når andre forhold ved lokaliteten (som temperatur eller oksygen) er ugunstige for fiskens fordøyelse og energiforbruk. Et annet mye brukt teknologisk verktøy er nedsenkbare lys. Opprinnelig ble kunstig lys for bruk i merder utviklet for å undertrykke fiskens kjønnsmodning og bedre veksten om vinteren. Det har imidlertid vist seg å også være et effektivt verktøy for å styre fiskens atferd. Tiltak som de to nevnt her kan altså brukes til å indirekte styre atferden til fisken. Dersom disse, gjerne i kombinasjon, brukes på riktig måte, kan de fungere som verktøy oppdretter kan bruke til å få fisken til å unngå deler av merden, svømme under et visst dybdesjikt eller liknende. Siden slik styring vil være basert på fiskens egne valg er dette trolig mindre krevene for fisken enn dersom de tvinges til å oppholde seg på et visst sted ved eksempelvis nottak eller andre barrierer.

22.4.4 Lukka merd/gjennomstrømsanlegg

Lukka merder i sjø, og gjennomstrømsanlegg på land, skiller seg fra åpne merder ved at det er mulig å behandle vannet som går til og fra produksjonsvolumet. Til gjengjeld må man frakte, oftest pumpe, vannet gjennom oppdrettsvolumet for å fortynne ut avfallsstoffene som fisken produserer. Fordi vannet ikke gjenbrukes må man pumpe, og eventuelt behandle, svært store mengder vann i disse systemene for å holde avfallsstoffene på tilfredsstillende nivåer i oppdrettsvolum med høye tettheter av fisk som vokser fort. Dette koster energi og tar plass, og begrenser hvor god rensing det er praktisk og økonomisk å gjennomføre.

Vannkvaliteten i råvannet avhenger av kilden, som kan være for eksempel sjøvann fra dyppet eller ferskvann fra en innsjø eller elv. Inntaksvannbehandlingen varierer litt etter hva som er utfordringene i råvannet. I noen ferskvannskilder har man for eksempel problematiske nivåer av metaller bundet til humus, mens man ikke har det samme problemet i sjøvann. I sjøvann er man imidlertid i større grad knyttet til resten av verden når det gjelder mikroorganismer enn det man er i enkelte ferskvann.

Aktuelle inntaksvannbehandlinger er varierende grad av filtrering og partikkelfjerning, ulike typer desinfeksjon, metallfelling, lufting, pH-regulering og varmeveksling. Uavhengig av inntaksvannbehandling vil det alltid være en annen vannkvalitet der fisken er enn i inntaksvannet, siden mikroorganismer vokser på overflater og i vannet og både fisk og mikroorganismer forbruker oksygen og produserer avfallsstoffer som raskt endrer vannkvaliteten i det lukka volumet. Det er derfor viktig å måle vannkvaliteten der fisken er, eller i utløpet, for å vite hvordan produksjonsforholdene er.

Oksygenering

Ved høye tettheter av fisk er det ikke nok oksygen i inntaksvann med 100% oksygenmetning til å sikre en god oksygenmetning (>80%) i oppdrettsvolumet i lukka merder eller kar. I gjennomstrømssystemer og lukka merder tilføres derfor ekstra oksygen for å kunne ha høy tetthet og produksjon. Oksygen fra oksygentanker tilføres som gass eller oksygenovermetta vann i inntaksvannet eller direkte i bunnen av merda/karet ved hjelp av diffusorer, venturipumper eller oksygenkjegler der oksygenet presses inn i vannet under trykk.

Gjenbrukssystemer

Gjenbrukssystemer skiller seg fra lukka merder og gjennomstrømsanlegg ved at en del av vannet i utløpet renses og gjenbrukes. Gjenbruk gjør at inntaksvannstrømmen, og dermed behovet for pumping og vannbehandling av inntaksvann, reduseres betydelig. Gjenbruk kan også gi temperaturfordeler ved at eventuelt oppvarmet eller nedkjølt vann blir igjen i systemet lengre. Til gjengjeld må en delstrøm behandles og pumpes tilbake til oppdrettskaret. Fordelen med det gjenbrakte vannet er at det allerede er rensert for metaller og smitte utenfra, så gjenbruksvannbehandlinga dreier seg om å fjerne avfallsstoffene som fisken har produsert i karet. Mer spesifikt dreier det seg om å rense ut avføringspartikler og CO₂ for å kunne gjenbruke vannet til å fortynne ut nye partikler og CO₂ som hele tiden produseres, og dermed holde lave nok konsentrasjoner av disse i karet. Gjenbruksstrømmen dimensjoneres sånn at man har nok inntaksvann til uttynningen av TAN fra systemet til å sikre at likevektskonsentrasjonen av uionisert ammoniakk ved maksimal føring er på trygt nivå for god drift. Gjenbrukssystemer gjenbraker typisk opp til 50-60% av vannstrømmen.

Fjerning av større partikler

Vannet som gjenbrukes filtreres først gjennom et trommelfilter eller tilsvarende, der mesteparten av de store partiklene fjernes fra vannet og ledes ut som slam. Det er fornuftig å fjerne partiklene raskt og skånsomt fra vannet, så ikke avføringa fra fisken løser seg opp i mindre partikler som er vanskelige å fjerne. Trommelfiltre er tromler med filterduk som er delvis neddykka i vannet. Det skitne vannet renner på innsida og filtreres gjennom duken så rent vann kommer ut på utsida av trommelen. Partiklene samler seg på innsida av duken og danner etter hvert en filterkake som tetter duken. Når duken er passelig full av partikler (enten styrt av nivåforskjellen på vannet eller etter en viss tid) dreier trommelen rundt og løfter slammet opp i lufta der det spyles av duken ned i ei oppsamlingsrenne. Annen teknologi som kan brukes til det samme er for eksempel båndfiltre og diskfiltre.

CO₂-lufting

Etter partikkelfjerning luftes vannet i en CO₂-lufter som flytter CO₂ fra vannet over i luft. Lufteren kan også være på en egen sidestrøm i karet, såkalt karintern lufter, med en sil på inntaket for å hindre at større partikler kommer inn i lufteren. Drivkraften for lufting av CO₂ er konsentrasjonsforskjellen mellom vannet og lufta i kontakt med vannet. Fisken produserer CO₂ i metabolismen og vannet i karet har derfor en forhøyet konsentrasjon. I kontakt med luft med vanlig CO₂-nivå vil CO₂ gå fra gjenbruksvannet til lufta. Etter hvert blir lufta like metta med CO₂ som vannet, og transporten av CO₂ stopper. I lufteren er det derfor viktig å hele tida tilføre ny frisk luft med lavt CO₂-innhold for å fjerne CO₂ fra vannet. Dette kan gjøres på flere måter, ved å risle dråper av vann gjennom en luftstrøm (risletårn), ved å boble luft gjennom vannet, ved å bruke en venturi til å presse luft inn i vannet, ved å kaste vann opp i luft eller å lage fossefall. Effektiviteten av CO₂-luftinga øker med økende kontaktflate og konsentrasjonsforskjell mellom vann og luft og med lavere pH. Lavere pH gjør nemlig at mer av det uorganiske karbonet (summen av CO₂, bikarbonat, HCO₃⁻ og karbonat, CO₃²⁻) foreligger på den utluftbare gassformen (CO₂). Som et resultat av luftinga vil pH gå opp i vannet fordi CO₂ fjernes.

Vakuumlufting

Vakuumlufting kan gjøres i en sidestrøm eller i forbindelse med CO₂-luftinga for å fjerne eventuell totalgass- eller nitrogengassovermetning i vannet. Vakuumluftere er konstruert som et lukket risletårn der dråper av vann risler gjennom en strøm av frisk luft, og der luftsug/vakuomet er så sterkt at vannivået inne i lufteren løftes omtrent en halvmeter.

22.4.5 Resirkulerende akvakultursystemer (RAS)

Resirkulerende akvakultursystemer (RAS) skiller seg fra gjenbrukssystemer ved at mer av vannet renses og gjenbrukes. RAS har de samme vannbehandlingsbehovene som gjenbrukssystem, men istedenfor å fortynne ut ammoniakk med nytt vann brukes et biofilter for å omdanne ammoniakk til mindre giftig nitrat. Nitraten fortynnes så fra systemet til ønsket likevektskonsentrasjon med spede vann. Siden konsentrasjonen av nitrat kan være mye høyere enn TAN i anlegget før det går ut over produksjonen, trenger RAS mye mindre spede vann enn gjenbrukssystemene. RAS gjenbruker typisk 90-99% av vannstrømmen. Alle fordelene og ulempene med gjenbruk av vann forsterkes dermed også med RAS sammenlignet med gjenbrukssystemer. En fordel med å gjenbruke mest mulig av vannet er at avfallsstrømmene fra anlegget blir mye mer konsentrerte sammenlignet med systemer som bruker mer vann, noe som gjør næringsstoffene lettere å rense og gjenbruke. En ulempe med å gjenbruke mye av vannet er at små partikler som er vanskelige å fjerne akkumuleres i systemet. Avhengig av artens toleranse for turbiditet kan det derfor være nødvendig med et ekstra rensetrinn for små partikler for å tilby god vannkvalitet i systemet.

Biofilter

Biofilteret består av en stor overflate med bakterier som omdanner ammoniakk i vannet, først til nitritt og så videre til nitrat i en prosess kalt nitrifikasjon. De nitrifiserende bakteriene henter energi fra oksidasjon av ammoniakk og nitritt med oksygen, og karbon fra bikarbonat i vannet, og er dermed primærprodusenter som ikke bruker organisk materiale. Fordi energiutbyttet fra ammoniakk og nitritt er lavt, vokser de nitrifiserende bakteriene sakte i forhold til heterotrofe bakterier som får energi og karbon fra organisk materiale, og som også bruker oksygen. Oksygenet brukes fort opp innover i biofilmen fordi både heterotrofe og nitrifiserende bakterier trenger det, derfor er det ikke oksygen eller nitrifikasjon innenfor ca. 200 µm inn i biofilmen. Dersom det er mye organisk materiale i vannet vokser

de heterotrofe bakteriene til en tykk biofilm, og nitrifiseringen blir mindre effektiv. Nitrifiseringen skjer i to trinn, som utføres av to ulike grupper bakterier: de ammoniakkoksiderende (AOB) og de nitrittoksiderende (NOB) bakteriene. NOB er mer sårbare, og kan stoppe omdanninga av nitritt mens AOB fortsetter å omdanne ammoniakk, for eksempel ved lav pH. En slik ubalanse fører til nitrittopphopning i systemet. For god biofiltereffektivitet må man passe på at vannkvaliteten er innenfor kravene til de nitrifiserende bakteriene. Det innebærer blant annet høy nok alkalitet (>50 mg/L som CaCO₃), passelig pH (>7) og tilgang på oksygen og ammoniakk. Nitrifiseringseffektiviteten er avhengig av temperatur. Fordi biofilterbakteriene er levende, kan de drepes av for eksempel kjemikalier og de kan sulte. Når biofilteret sulter eller holder på å dø av andre årsaker lager ofte bakteriene mye skum.

Fordi de nitrifiserende bakteriene vokser relativt sakte tar det tid før de vokser opp til et antall som kan ta unna mye ammoniakk. Et nytt biofilter, eller et biofilter som ikke har fått ammoniakk på en stund, må derfor føres opp med gradvis mer ammoniakk. For mye eller for lite ammoniakk stopper modningsprosessen, så det er viktig å måle vannkvaliteten daglig. Modning av et helt nytt biofilter tar minst 5-6 uker med gode forhold for bakteriene. Fordi det er ulike arter av bakterier som utfører nitrifisering ved lav og høy salinitet, er det lurt å modne biofilteret ved den saliniteten det skal brukes. Store endringer i salinitet kan gjøre at biofilteret slutter å virke for en tid.

Det finnes ulike typer biofiltre, de vanligste er moving bed og fixed bed. Begge typer biofiltre består av plastmedie med stor overflate per volum biofilter. I moving bed har biomediet nøytral oppdrift og flyter i vannvolumet, mens det er tyngre og synker ned i fixed bed biofiltre. I moving bed biofiltre holdes biomediet hele tiden i bevegelse av luftbobler, slik at biofilmen som hele tida produseres skaller av overflatene. Moving bed biofiltre er derfor selvrensende og produserer hele tida små partikler av biofilm. Fixed bed biofiltre fungerer derimot som et finpartikkelfilter fordi biomediet ligger stille under drift, men må til gjengjeld tilbakespyles av og til for å unngå for tykk biofilm og risiko for H₂S. Under tilbakespyling kjøres det masse luft og vann i biofilteret for å bevege på biomediet og slå løs biofilm. Tilbakespylingsvannet slippes ut av anlegget, og bidrar derfor til økt vannforbruk.

Partikkelfjerning av små partikler

Små partikler (<20 µm) akkumulerer i lukka systemer med høy resirkuleringsgrad fordi de ikke fjernes i trommelfilteret og fortyninga fra systemet er lav. Det finnes ulike teknologiske løsninger for å fjerne små partikler fra en delstrøm av produksjonsvannet, der de vanligste er proteinskimming og fixed bed biofiltre (se avsnitt over). Membranfiltrering av en delstrøm kan også være aktuelt, men er ikke mye brukt i dag.

Fixed bed biofiltre filtrerer ut små partikler som blir værende i filteret til de brytes ned av bakterier eller tilbakespyles ut av systemet. Jo lengre tid mellom tilbakespyling, jo mer effektivt filtreres små partikler ut av vannstrømmen, men jo mer øker også risiko for H₂S-produksjon. Risiko for H₂S gjør at fixed bed biofiltre ikke er vanlig i systemer med brakk- eller sjøvann.

Proteinskimmere er høye sylindere der små luftbobler blåses inn i bunnen og stiger motstrøms opp gjennom det skitne vannet. Små partikler, molekyler og mikroorganismer fester seg i overflata mellom vannet og lufta i boblene og løftes ut som skum som renner over en kant i toppen av skimmeren. Der spyles skummet ned i avløp. Fordi boblestørrelsen er mindre i sjøvann enn i ferskvann blir det mer overflate og bedre rensing i skimmere med sjøvann. Effektiviteten stiger ganske lineært med saltinnhold fra omtrent 25% effektivitet ved 0 ppt til omtrent 70% ved 35 ppt salinitet, avhengig av vannkvalitet. Ozon øker effektiviteten av skumminga ved at det kutter opp de organiske molekylerne i vannet, som gjør at de fester seg lettere til boblene. Proteinskimmere med ozonering er ikke desinfeksjon, siden doseringa av ozon er for lav til å drepe særlig mange mikroorganismer. Likevel bidrar proteinskimmere med ozonering til bedre vannkvalitet og lavere antall bakterier i systemet ved at bakterier og organisk materiale (bakteriemat) hele tida fjernes fra vannet.

Zero exchange systemer (ZES)

Zero exchange systemer (ZES) skiller seg fra RAS ved at nitratet fjernes med denitrifisering istedenfor fortykning med spede vann. I ZES reduseres dermed behovet for nytt vann til det som trengs for å erstatte det som forlater anlegget med slam, fisk og fordamping. I tillegg

til denitrifisering har ofte ZES fosfor- og metallfelling for å unngå akkumulering i systemet på grunn av den svært lave fortynninga. I praksis er dette et parikkelfjerningstrinn der metallene og fosforet kommer ut i slammet. Bruk av ZES kan være motivert av mangel på vann (som på Færøyene og i Israel), utslippskrav (som for eksempel noen steder i Storbritannia og EU) eller ønske om høy grad av kontroll på vannkvaliteten (som hos noen anlegg i Norge).

Denitrifisering

Nitrat (NO_3^-) er endeproduktet fra omdanningen av ammoniakk i det nitrifiserende biofilteret som oppkonsentreres i resirkuleringsystemer. Denitrifiserende bakterier kan bruke nitrat for å oksidere organisk materiale for å få energi. Produktet av denne reaksjonen er nitrogengass (N_2) og CO_2 . Nitrogengassen som produseres luftes ut av vannet. Denitrifisering skjer kun i fravær av oksygen, som er et mer effektivt oksidasjonsmiddel og derfor foretrekkes dersom det er tilgjengelig. Omdanninga av nitrat til nitrogengass skjer i flere etterfølgende trinn med flere mellomprodukter. Prosessen produserer bakteriebiomasse og øker alkaliteten i vannet. Fordi de heterotrofe denitrifiserende bakteriene kan vokse raskt, tar det mye mindre tid å starte opp denitrifiseringsreaktorer (noen få dager) enn nitrifiserende biofiltere (ca. 6 uker).

En denitrifiseringsreaktor ligner et nitrifiserende moving bed biofilter (se avsnitt over), men biomediet bevegges av propeller, og ikke blåsere, for å unngå tilførsel av annet oksygen enn det som allerede er i vannet som skal behandles. Bakteriene trenger tilførsel av organisk materiale for å utføre denitrifisering. Slam fra anlegget kan brukes, men er vanskelig å bryte ned for bakteriene. Eksterne karbonkilder som for eksempel etanol gir høyere effektivitet, mindre reaktorvolum og er lettere å dosere. Mengden organisk karbonkilde må balanseres mot mengden nitrat. Dersom det fremdeles er organisk materiale igjen når oksygen og nitrat er brukt opp, vil sulfatreduserende bakterier bruke tilgjengelig sulfat og produsere giftig H_2S . Dersom det er for lite organisk materiale i forhold til nitrat kan denitrifikasjonen stoppe etter noen få av mange reaksjonstrinn og man ender opp med uønskede mellomprodukter, for eksempel nitritt. Nøyaktig dosering av karbonkilde knyttes til nitrat- og/eller oksygenmåling med sensor.

Akvaponisystemer

Nitratet som produseres i det nitrifiserende biofilteret slippes ut med avløpsvannet i RAS, og som nitrogengass i ZES. I akvaponisystemer brukes nitratet sammen med andre løste næringsstoffer i stedet som gjødsel i plante- eller algeproduksjon i vann eller fuktig luft. Slammet fra RAS kan også mineraliseres i en reaktor, og brukes i akvaponi. Et viktig poeng for økt bærekraft er at man på denne måten flytter næringsstoffene fra avfallet til fisken inn i verdifulle nye produkter. En utfordring med akvaponisystemer er at plantedelen krever et dyrkingsareal som er typisk 7-10 ganger arealet til oppdrettsanlegget. Dyrking av foto-trofe organismer krever tilførsel av enten naturlig eller kunstig lys. Siden næringsstoffene fra fisken er løst i store vannvolum må dyrkingsarealet ligge nært oppdrettsanlegget. En annen utfordring er at plante- eller algearten kan ha andre krav til vannkvalitet enn fisken, så man trenger mer vannbehandling. Et viktig poeng er også biosikkerhet og mattrygghet, som krever kontroll og vannbehandling mellom fisken og plantene dersom de skal spises. Vannet fra plantedelen kan returneres til anlegget, slippes ut eller brukes til noe annet. De fleste planter trives ikke med salt i vannet, mens størstedelen av lakseproduksjonen i lukka anlegg skjer med sjø- eller brakkevann, eller ferskvann med litt salt (1-3 ppt) for fiskens del. Ulike alger kan tåle ulike saliniteter, så både mikro- og makroalger er relevante. Siden det kan være vanskelig å dyrke én art alge eller plante som passer akkurat med fiskens behov, er det også mulig at man dyrker samfunn med flere plante- eller algearter i framtida. Blandt samfunn kan være mer effektive til å ta opp næring, men verdien av biomassen som produseres kan gå ned sammenlignet med én verdifull art i monokultur.

For å begrense interaksjonene mellom natur og matproduksjon kan det i framtida gå mot mer biologisk lukka systemer, uten kontakt mellom ville og produserte mikrober og fisk, der vann, energi og avfallsstoffer ikke slippes ut, men gjenbrukes for å produsere føringredienser som erstatter villfangst og høsting av ressurser fra naturen.

22.5 STYRING OG REGULERING AV FISKENS MILJØ

Fram til i dag har forholdene for fisken, og dermed resultatene av produksjonen, vært svært avhengige av lokalitet, design og driftspersonale. For å øke produksjonen og senke risiko er det behov for finjustert kontroll i sanntid, der man ikke må vente til man kan se endringer med det blotte øyet, men kan forutse og regulere før synlige endringer skjer. Teknologit utviklingen går raskt for nyttige verktøy som automasjon, datakorrelasjon, dynamiske modeller og sensorer. Det er derfor gode muligheter for å utvikle gode kontroll- og styringssystemer for alle kjente faktorer som påvirker fiskens helse, overlevelse og vekst, og for effektiv bruk av ressurser som vann, næringsstoffer og strøm. Smart innhenting av data og datakorrelasjon gir mulighet for videre optimalisering av produksjonen. Det å systematisk ta i bruk teknologi for å søke mot en mer objektiv og kunnskapsbasert husdyrproduksjon ble først tatt i bruk innenfor landbruk under navnet «Precision Livestock Farming (PLF)» eller «presisjonshusdyrhold». I nyere tid har disse tankene blitt adoptert til fiskeoppdrett gjennom «Precision Fish Farming (PFF)» eller presisjonsfiskeoppdrett, som i tillegg tar inn over seg de ytterligere utfordringene som følger med å flytte produksjonen fra landmiljø til vannmiljø.

22.5.1 Åpen merd

I oppdrett i åpne merder er man som nevnt tidligere i stor grad prisgitt lokalitetens egenskaper når det gjelder produksjonsforholdene. Dette gjelder spesielt de fysiske faktorene (temperatur, bølger og strøm) og den kjemiske vannkvaliteten. Det finnes imidlertid i dag flere tiltak oppdretter kan bruke til å forbedre produksjonsforholdene i åpne merder.

Det mest åpenbare tiltaket er å øke bruken av sensorikk, gjerne i kombinasjon med prediktive matematiske modeller, til å skaffe et bedre overblikk over situasjonen og dynamikken i merdene. Gjennom dette kan oppdretter få et betydelig bedre grunnlag for beslutningsstøtte under produksjon, noe som gjør at operasjon er kan planlegges i forhold til nåværende og forventede forhold, og slik unngå å gjennomføre kritiske operasjoner når forholdene tilsier at dette ikke er lurt. Et eksempel her er at en ved å ha kontinuerlig oversikt over strøm- og bølgeforhold på lokaliteten kan planlegge for å ikke gjennomføre operasjoner der fisken må håndteres når forholdene står på som verst. Her kan det være nødvendig med både målinger og lokale matematiske modeller, siden bunntopografi og andre lokale forhold kan påvirke hvor ekstreme forholdene kan bli på en lokalitet. Oppdretter kan også bruke temperaturmålinger og -forventninger til å justere fôringsmetoden for å sikre mest mulig effektiv fôring i forhold til den forventede effekten temperaturen vil ha på fiskens fordøyelse og vekst. Videre kan også slike løsninger gi tidlig varsel om fremtidige hendelser som kan være ugunstige for fisken. Eksempler her kan være bruk av målinger og modeller til å forutse fremtidige alge- og manetoppblomstringer. Selv om slike hendelser er vanskelige å unngå, vil det å være klar over at de sannsynligvis vil inntreffe en stund før være gunstig for å kunne forberede seg best mulig for å unngå de mest alvorlige følgene.

Selv om de ovennevnte tiltakene kan bidra til å hindre/ redusere innvirkningen av uønskede hendelser og bedre planlegging av anleggsdriften, er fisken tross alt det viktigste elementet i prosessen. Bedre oversikt over fiskens tilstand og dynamikk er derfor potensielt enda mer verdifullt enn andre faktorer i et driftsscenario. Dette er også et område der næringa de siste årene har utviklet seg raskt. For noen tiår tilbake fantes det store anlegg ved kysten der det eneste metoden en brukte til å observere fisken mellom utsett og slakt var å se ned i merda fra gangbanen. I dag har så å si hver eneste merd nedsenkede fôringskamera som brukes til å følge med på fisken hele tiden under fôringen. Denne utviklingen har stimulert leverandørindustrien til å lansere stadig mer avanserte optiske løsninger som er i stand til å ikke bare tilby bilder av fisken under vann, men også analysere disse og gi ut verdier som beskriver fiskens tilstand som tallverdier. Eksempelvis er det i dag ikke uvanlig å finne optiske verktøy som automatisk estimerer individvekt (stereovideo eller biomasserammer) og lusettall i merden. Noen leverandører har også begynt å undersøke muligheten til å hente ut talldata som beskriver fiskens atferd og utseende fra kamerabilder, ofte basert på maskinlæring og andre metoder. Akustiske verktøy som ekkolodd og sonarer blir også stadig mer brukt av industrien. Disse blir primært brukt til å studere fordeling, og dels bevegelse, av fisk i merda, men forskningen har vist at mer detaljert informasjon om fiskens tilstand kan hentes fra slike systemer. Det finnes også teknologiske løsninger for å hente inn data på individnivå som biotelemetri og biosensorer. Slike løsninger krever at individfisk utstyres

med elektroniske enheter som måler parametere i eller nær fisken, og så lagrer data fra disse internt eller sender dem til mottaker. Selv om slike løsninger trolig er for kompliserte i bruk til å bli et etablert verktøy for næringa, kan de ha en industriell funksjon siden de kan gi data som beskriver fiskens fysiologi (noe ingen av de andre metodene kan). Dette kan være gjennom bruken av enkeltfisk med sensorer, såkalte «sentinel fish» («vaktfisk») i fiskegruppa under kritiske operasjoner som trening.

Selv om det finnes betydelig færre regulerbare enn målbare parametere i merda, har oppdretter muligheten til å kontrollere noen sentrale parametere gjennom drift og operasjon. Den viktigste av disse er fôringsregime- og metodikk. Gjennom å justere faktorer som fôringsstidspunkt, utfôringspunkt i merden og utfôret mengde per tidsenhet kan oppdretter ha en betydelig innvirkning på fiskens velferd, fysiologi og vekst. I dag gjøres dette mye basert på forhåndsutregninger og -planer, samt videobilder fra merda som beskriver fiskens fôringsrespons. Siden fôr er den aller viktigste innsatsfaktoren i moderne merdbasert oppdrett, er det en industriell vilje til å utvikle mer avanserte metoder for fôringskontroll der en tar i bruk datastrømmer fra observasjonsmetoder som de nevnt over. Det finnes eksempelvis firma som søker å styre fôringsystemet direkte basert på målinger med ekkolodd, og det vil trolig være en stor fremtidig utvikling på dette området i industriens søken mot å øke effektiviteten på fôring i åpne merder. En annen parameter oppdretter kan påvirke til en viss grad er lyset i anlegget. Selv om mesteparten av lyset i åpent merdoppdrett kommer fra naturens side, kan nedsenkbare lys som nevnt tidligere påvirke fiskens atferd. Dette kan brukes til å både få dem til å fordele seg annerledes, og til å påvirke svømmehastigheten (laks vil typisk svømme saktere ved svake lysforhold siden de er avhengig av visuell navigasjon). Dette er også et tiltak som i stor grad gjøres manuelt i dag, men som kunne vært automatisert ved å f.eks. justere lysenes posisjon og styrke i henhold til fiskens atferd og distribusjon, samt det ønskede målet med lysene. En tredje parameter som er verd å nevne her er oksygenmetningen i merda. Selv om denne parameteren i størst grad er gitt av lokalitetsforholdene (oksygenmetning på vannet som strømmer inn i merda) og forbruket til fisken, har det blitt utviklet teknologi for å aktivt øke oksygenmetningen i vannet i merder. Slike tiltak brukes i dag som regel til å øke oksygenmetningen under kritiske operasjoner som trening. Dette gjøres imidlertid som regel manuelt og ikke basert på målinger av de faktiske forholdene. En mer automatisert løsning kan bruke målinger av oksygenmetningen i vannet (oksygensensorer i vannsøylen) og fiskens faktiske oksygenforbruk – og behov (biosensorer/telemetri) til å styre tilleggstilførselen av oksygen i merda.

22.5.2 Lukka anlegg

Lukka anlegg er i større grad avhengig av teknologi og mindre styrt av naturen, noe som er en stor fordel i forbindelse med automasjon og regulering. Spesielt i systemer med stor grad av resirkulering av vannet (RAS, ZES og akvaponisystemer) er det mulig å måle og styre alle innsatsfaktorer og alle prosesser. Dette gjelder for eksempel vannstrømmer, utskiftningsrater og vannnivåer i systemet. Det gjelder fôring, avfallsstrømmer, vannkvalitet, temperatur og energibruk. Det gjelder også dosering av buffere, salt og ozon eller andre vannforbedringsmidler. Det er også mulig å hente inn mye informasjon om fisken som flyttes mellom kar, som antall, vekt og størrelsesfordeling.

På grunn av den sterke avhengigheten av teknologi er måling og overvåking av vannkvalitet og funksjon av vannbehandling nødvendig for god og sikker drift av lukka anlegg. Det finnes allerede sensorer for å måle flere av de viktigste vannkvalitetsvariablene, og flere er under utvikling og forbedring. Man bør imidlertid aldri stole helt på en sensor, og det er viktig å kalibrere og dobbeltsjekke dem. For de mest kritiske variablene bør man ha redundans gjennom flere like sensorer som måler på samme sted. Biofilm vokser fort opp på overflater i lukka systemer, så det er viktig å rengjøre sensorene jevnlig så de måler de faktiske forholdene i vannet. Noen vannkvalitetsvariable fins det enda ikke gode nok sensorer for, men de kan måles med kjemikaliekit i spektrofotometer i laben. Ulempen er at nøyaktigheten er avhengig av personen som utfører spektrofotometerestene, og at målingene er tidkrevende og bare blir tatt maksimalt noen få ganger i døgnet. På grunn av høy turbiditet og farge på produksjonsvannet i lukka anlegg er det mye vanskeligere å bruke kamerabasert teknologi for å overvåke fisken enn i åpne merder i sjøen.

22.5.3 Fremtidens oppdrettsmetoder

Dagens praksis innen oppdrett i både lukka produksjonsenheter og åpne merder har de siste åra tatt stadig flere teknologiske løsninger i bruk. Dette har resultert i at drift og operasjon av anlegg er mindre basert på manuelt arbeid og erfaringer, og dermed mer kunnskapsbasert og objektiv enn den var før. Det er imidlertid grunn til å tro at flere muliggjørende teknologier som har skutt fart innen andre sektorer vil bli utslagsgivende i hva som blir fremtidas oppdrettsnæring i Norge. Eksempelvis vil trolig dynamiske matematiske modeller sydd sammen med sanntidsmålinger i det vi i dag kaller digitale tvillinger være et sentralt element. Digitale tvillinger kan brukes til å både skaffe et unikt og helhetlig bilde av den dynamiske prosessen i merden eller karet, og kan sågar utvikles til å ha evnen til å forutse sannsynlig utvikling basert på nåværende tilstand i anlegget. Siden drifta i lukka systemer er kompleks, med gjenbruk av vann og mye vannbehandlingsteknologi, er det viktig for driftspersonalet å ha god og samlet oversikt over den viktigste informasjonen som trengs for å ta beslutninger. Dette understreker behovet for å ha både evnen til å overvåke dagens situasjon, og å forutse fremtidig tilstand. Det samme gjelder i stor grad for merdoppdrett, spesielt dersom en søker å styre føring og andre innsatsfaktorer mot måltall i form av ønsket vekst og fremtidig sluttvekt, og for å bedre planlegge kritiske operasjoner.

Et sideblikk mot historikken innenfor andre viktige globale sektorer som bilproduksjon, olje og gass og kraftproduksjon viser at disse har beveget seg stadig mer fra manuelt utførte oppgaver mot mer automatiserte operasjoner og høyere autonomitet. Med dette som inspirasjon, kan vi dermed anta at framtidens oppdrett vil være preget av at vi i større grad lar systemene tar avgjørelsene selv, med manuell overstyring ved behov. Rolla til driftspersonalet vil samtidig endre seg fra å være operasjonell i dag til en kontrollørfunksjon i framtida, som er nettopp det som har skjedd i andre mer modne industrisektorer. Finjustert styring og tidlig regulering reduserer svingninger i vannkvalitet og gjør at man hele tiden kan ligge i optimalt produksjonsområde. Framtidens autonome anlegg kan forhåpentligvis gi god fiskehelse, høy overlevelse, optimal vekst og kontroll på vann-, fôr- og energibruk og avfallsstrømmene i systemet.

22.6 LITTERATUR

22.6.1 Anbefalt lesing

Lekang OI (ed). 2020. Aquaculture Engineering 3rd edition. Wiley Blackwell, ISBN 9781119489016

Timmons MB, Guerdat T and Vinci BJ (eds). 2018. Recirculating Aquaculture 4th Edition. Ithaca Publishing Company LLC, ISBN-10 097264678

LLUSTRASJONER OG FIGURER

Illustrasjonene i kapittel 22 er laget av bidragsyterne som vist under. Eventuelle copyrightigheter og eierskap beholdes uten avkortning.

Kari Attramadal: Tabell 22.1, figur 22.1, 2, 4, grunnlag for 5 og 6,

Knut Gangåssæter, Doghouse: 22.3, 5 og 6, 7, 8

Sterner AS: Bilder og illustrasjoner av RAS og komponenter benyttet i figurene 22.5 og 6 med tillatelse.