EFFEKTEN AV KLIMAENDRINGER PÅ RISIKO FOR DÅRLIG DYREVELFERD OG NEGATIVE MILJØEFFEKTER AV FISKEOPPDRETT – KUNNSKAPSSTATUS

Redaktør(er): Mari Skuggedal Myksvoll, Katherine Mary Dunlop, Malthe Hvas, Ingrid Askeland Johnsen og Monica F. Solberg (HI)



RAPPORT FRA HAVFORSKNINGEN NR. 2026-20

Tittel (norsk og engelsk):

Effekten av klimaendringer på risiko for dårlig dyrevelferd og negative miljøeffekter av fiskeoppdrett – kunnskapsstatus

The impact of climate change on the risk of poor animal welfare and negative environmental effects of aquaculture – current state of knowledge

Rapportserie:	År - Nr.:	Dato:
Rapport fra havforskningen	2026-20	15.04.2026

ISSN:1893-4536

Forfatter(e):

Mari Skuggedal Myksvoll, Anne-Catrin Adam, Ann-Lisbeth Agnalt, Lasse Berg Andersen, Lars Asplin, Thomas Bøhn, Sussie Dalvin, Katherine Mary Dunlop, Kevin Glover, Søren Grove, Bjørn Einar Grøsvik, Rita Hannisdal, Alison Harvey, Solfrid Sætre Hjøllo, Vivian Husa, Malthe Hvas, Ingrid Askeland Johnsen, Egil Karlsbakk, Ørjan Karlsen, Bjørn Olav Kvamme, Bjørn Tore Lunestad, Abdullah Sami Madhun, Nachiket Marathe, Craig Morton, Lars-Johan Naustvoll, Rune Nilsen, Jonatan Nilsson, Geir Ottersen, Aoife Elizabeth Parsons, Ma Michelle Demogina Penaranda, Sofie Remø, Ole Samuelsen, Monica Sanden, Nina Sandlund, Anne Dagrun Sandvik, Anne Britt Sandø, Rosa Maria Serra-Llinares, Rasmus Skern, Morten D Skogen, Cecilie Skår, Monica F. Solberg, Lars Helge Stien, Kjell Rong Utne og Pauline Wischhusen (HI)
Redaktør(er): Mari Skuggedal Myksvoll, Katherine Mary Dunlop, Malthe Hvas, Ingrid Askeland Johnsen og Monica F. Solberg (HI)

Godkjent av: Forskningsdirektør(er): Geir Lasse Taranger
Programleder(e): Mari Skuggedal Myksvoll

Distribusjon:

Åpen

Prosjektnr:

15742

Program:

Miljøeffekter av akvakultur
Fremtidens havbruk

Forskningsgruppe(r):

Bentisk økologi, Smittespredning og sykdom, Populasjonsgenetikk, Kystoseanografi, Dyrevelferd, Fremmed- og smittestoff (FRES), Økosystemprosesser, Oseanografi og klima

Antall sider:

100

Sammendrag (norsk):

Klimaendringene som allerede påvirker norske kyst- og fjordområder fører til økt vanntemperatur, hyppigere marine hetebølger, større nedbørsmengder, mer avrenning fra land (næringsstoffer, miljøgifter og avløp), lavere saltholdighet og redusert oksygennivå i vannmassene. Disse fysiske og kjemiske klimaendringene fører til mindre robuste økosystemer, der samlet påvirkning endres og vil redusere deres toleranse for miljøeffekter fra akvakultur. Oppvarmingen av havet og den økende forekomsten av ekstreme temperaturhendelser skaper et mer utfordrende miljø for både oppdrettet og vill laksefisk, og miljøendringene forventes å forsterkes frem mot 2050.

For oppdrettslaks innebærer et varmere klima at viktige fysiologiske terskler overskrides oftere. Laks har optimal vekst ved 10–14 °C, men appetitt og vekst reduseres markant når temperaturen nærmer seg 18–19 °C. Ved temperaturer over 20 °C slutter fisken å spise, og ved langvarige perioder over 22 °C øker dødeligheten. Med økende temperatur faller oksygeninnholdet i vannet, noe som gir en dobbel belastning der fisken både trenger mer oksygen, men samtidig får mindre tilgang på det. Kombinasjonen varme og hypoksi gir økt sannsynlighet for stress, dårligere immunfunksjon, høyere forekomst av sykdommer og flere produksjonslidelser som grå stær (katarakt). Stor laks er særlig utsatt, og også triploid (steril) laks viser redusert robusthet i varmere og mer oksygenfattige miljøer. Det antas at smittepresset fra lakselus vil øke, både på grunn av raskere generasjonstid, høyere smitteevne og høyere produksjon av lus ved økt vanntemperatur. For å holde lusetallene nede vil antall avlusninger sannsynligvis øke, noe som i kombinasjon med økt temperatur og redusert oksygenmetning kan gi økt dødelighet. Klimaendringene forventes derfor å forsterke kjente velferdsproblemer ved at oppdrettslaksen oftere utsettes for håndtering og dermed blir mer sårbar for utvikling av sykdom.

Miljøeffektene fra lakseoppdrett på vill laksefisk vil sannsynligvis også endre seg med endringer i klima. Som for oppdrettsfisken, vil økt smittepress fra lakselus kunne gi økt påslag av lakselus på vill laksefisk. Dette er en spesielt alvorlig utfordring for sjøørret og sjørøye, som oppholder seg lenge i kystnære områder. Samtidig ventes klimadrevne endringer i sykdomsbildet. Hvilke er høyst usikkert, men eksempler kan inkludere økende forekomst av bakterielle sykdommer som pasteurellose og piscirickettsiose, og mer amøbegjellesykdom i perioder med høy temperatur og saltholdighet. Økt forekomst av sykdom i oppdrett vil kunne øke sannsynligheten for at også vill laksefisk blir smittet og utvikler sykdom.

I tillegg til endret belastning fra fiskeoppdrett blir også vill laksefisk påvirket av de samme klimaendringene, men på ulike måter avhengig av art. Sjørøya er den mest klimautsatte arten, siden den er tilpasset lave temperaturer og reagerer med stress og svekket overlevelse når havet blir varmere. Sjøørret kan i noen tilfeller oppleve økt vekst i varmere vann, og tåler høyere temperaturer bedre enn sjørøya. I områder med begge arter kan derfor sjørøya møte økt konkurranse fra sjøørreten. Vill laksefisk påvirkes gjennom endrede temperatur- og vannføringsforhold i elver, forskjøvet tidspunkt for smoltutvandring og endringer i næringstilgang i havet. Tidligere tidspunkt for smoltutvandring kan bidra til at økt smittepress fra lakselus ikke gir like stort utslag for laksen som for sjøørret og sjørøye. Samlet sett antas det likevel at sannsynligheten for negativ påvirkning fra oppdrett på vill laksefisk øker, særlig gjennom mer lakselus, mer smitte og større belastning på svekkede bestander.

Klimaendringer forventes også å øke sannsynligheten for rømming. Mer ekstremvær og økt behov for håndtering og avlusning øker sannsynligheten for rømming og en større andel rømt fisk kan nå elvene og ta seg opp til gyteplassene. Dette øker sannsynligheten for genetisk innkryssing med villaks, som igjen kan bidra til å svekke populasjonenes robusthet mot ytre påvirkning. Villaksbestander som allerede er svekket av klimaendringer, sykdom og redusert mattilgang vil være spesielt utsatt.

En robust populasjon er det viktigste grunnlaget for å tåle både naturlige og menneskeskapte stressfaktorer. Når klimaendringene svekker denne robustheten, endres også vurderingen av risiko fra oppdrettsaktivitet. Ikke bare kan påvirkningene fra oppdrett forverres, men klimaendringene endrer også rammene for hva som er bærekraftig og hva naturen faktisk tåler.

Også miljøeffekter fra organiske utslipp, miljøgifter og legemidler antas å endre seg med klimaendringene. Utslippsmengden av næringssalter fra fiskeoppdrett vil ikke endre seg med endret klima, men effekten av utslippene kan påvirke planteplanktonproduksjon og biodiversitet i makroalgesamfunn. Dårligere vannutskiftning gjør at organisk materiale brytes ned langsommere, og kan føre til opphopning av utslipp som miljøgifter og legemidler. Økende temperatur gir mer begroing av oppdrettsnøtene og kan dermed gi økt bruk av antigroemidler som kobber eller andre kjemiske forbindelser som hindrer alge- og plantevekst. Flere avlusninger kan føre til større utslipp av legemidler, som kan få sterkere effekt på sårbare arter i et varmere og mer belastet økosystem.

Samlet peker rapporten på et tydelig mønster: klimaendringene forsterker mange av dagens utfordringer knyttet til fiskevelferd, sykdom, rømming og miljøpåvirkning. Dette fører til et mindre robust økosystem og en høyere samlet risiko for både oppdrettsfisk, vill laksefisk og marint miljø. Det konkluderes med at betydelige kunnskapshull fortsatt finnes, særlig knyttet til patogeners respons på klimaendringer, langtidsendringer i fjordsirkulasjon og ernæringsbehov hos oppdrettslaks i varmere klima, og at fremtidig forvaltning vil kreve ny kunnskap, ny teknologi og mer tilpasningsevne enn i dag.

Sammendrag (engelsk):

Climate change, which is already affecting Norwegian coastal and fjord areas, is leading to increased water temperatures, more frequent marine heatwaves, greater amounts of precipitation, more runoff from land (nutrients, pollutants and wastewater), lower salinity, and reduced oxygen levels in the water masses. These physical and chemical climate changes result in less robust ecosystems, where cumulative impacts shift and reduce their tolerance for environmental effects from aquaculture. Ocean warming and the increasing occurrence of extreme temperature events create a more challenging environment for both farmed and wild salmon, and these environmental changes are expected to intensify toward 2050.

For farmed Atlantic salmon, a warmer climate means that important physiological thresholds are exceeded more often. Salmon grow optimally at 10–14 °C, but appetite and growth decrease significantly as temperatures approach 18–19 °C. At temperatures above 20 °C the fish stop eating, and prolonged periods above 22 °C increase mortality. With rising temperatures, oxygen content in the water decreases, creating a double burden where the fish need more oxygen while simultaneously having less available. The combination of heat and hypoxia increases the likelihood of stress, weakened immune function, higher incidence of disease, and more production-related disorders such as cataracts. Large salmon are particularly vulnerable, and triploid (sterile) salmon also show reduced robustness in warmer, more oxygen-poor environments. It is assumed that infection pressure from salmon lice will increase, due to faster generation times, higher infectivity, and greater lice production at elevated water temperatures. To keep lice numbers down, the number of delousing events will likely rise, and in combination with higher temperatures and reduced oxygen saturation, this may increase mortality. Climate change is therefore expected to amplify known welfare challenges by exposing farmed salmon more frequently to handling, making them more susceptible to disease.

Environmental impacts from salmon farming on wild salmonids are also likely to change with shifts in climate. As with farmed fish, increased infection pressure from salmon lice may result in higher lice loads on wild salmonids. This is a particularly serious challenge for sea trout and Arctic char, which remain in coastal areas for long periods. Climate-driven changes in disease dynamics are also expected. Although highly uncertain, examples may include increased occurrence of bacterial diseases such as pasteurellosis and piscirickettsiosis, and more amoebic gill disease during periods of high temperature and salinity. Increased disease occurrence in aquaculture may raise the risk that wild salmonids also become infected and develop disease.

In addition to altered pressures from aquaculture, wild salmonids are also affected by the same climate changes, though in different ways depending on species. Arctic char is the most climate-sensitive species, as it is adapted to cold waters and responds with stress and reduced survival when the ocean warms. Sea trout may in some cases experience increased growth in warmer water and tolerates higher temperatures better than Arctic char. In areas where both species occur, Arctic char may therefore face increased competition from sea trout. Wild salmonids are affected by changing temperature and river discharge patterns, shifts in the timing of smolt migration, and changes in food availability in the ocean. Earlier smolt migration may mean that increased infection pressure from salmon lice has a smaller effect on salmon compared to sea trout and Arctic char. Overall, however, the likelihood of negative impacts from aquaculture on wild salmonids is expected to increase, particularly through more salmon lice, more disease transmission, and higher pressure on already weakened stocks.

Climate change is also expected to increase the likelihood of fish escapes. More extreme weather and increased need for handling and delousing raise the risk of escape events, and a larger proportion of escaped fish may reach rivers and move up to spawning grounds. This increases the probability of genetic introgression into wild salmon, which can weaken population resilience to external pressures. Wild salmon populations already weakened by climate change, disease, and reduced food availability will be particularly vulnerable.

A robust population is the most important foundation for tolerating both natural and human-induced stressors. When climate change reduces this robustness, the assessment of risk from aquaculture activity also changes. Not only may the impacts from aquaculture worsen, but climate change also alters the framework for what is sustainable and what nature can actually withstand.

Environmental effects from organic waste, pollutants, and veterinary medicines are also expected to change with climate change. The amount of nutrient discharge from aquaculture will not change with a shifting climate, but the effects of these discharges may influence phytoplankton production and biodiversity in macroalgal communities. Reduced water exchange slows the breakdown of organic material and can lead to accumulation of pollutants and medicinal residues. Increasing temperatures cause more fouling of aquaculture nets, which can result in increased use of antifouling agents such as copper or other chemical compounds that prevent algal and plant growth. More frequent delousing treatments may lead to larger releases of veterinary medicines, which can have stronger effects on vulnerable species in a warmer and more stressed ecosystem.

Overall, the report points to a clear pattern: climate change amplifies many of today’s challenges related to fish welfare, disease, escapes, and environmental impact. This leads to a less robust ecosystem and a higher overall risk for farmed fish, wild salmonids, and the marine environment. It concludes that significant knowledge gaps

remain—particularly regarding pathogen responses to climate change, long-term changes in fjord circulation, and nutritional needs of farmed salmon in a warmer climate—and that future management will require new knowledge, new technology, and greater adaptive capacity than today.

Innhold

1 Introduksjon 8

2 Beskrivelse av fysiske og kjemiske klimaendringer 9

2.1 Oppsummering 9

2.2 Globale trender i klimaendringer 9

2.2.1 FNs klimapanel (IPCC), utslippsscenarier og projeksjoner 9

2.2.2 Temperaturendringer 10

2.2.3 Marine hetebølger 10

2.2.4 Havforsuring og oksygeninnhold 11

2.3 Klimaendringer i norske kyst og fjordområder 11

2.3.1 Temperaturendringer 12

2.3.2 Marine hetebølger 18

2.3.3 Miljøforhold på lokalitetene 19

2.3.4 Nedbør og avrenning 22

2.3.5 Utskiftning av bunnvann i terskelfjorder 22

2.3.6 Stormaktivitet 22

2.3.7 Klimaprojeksjoner 23

3. Velferd til norsk oppdrettslaks i et klimaperspektiv 24

3.1 Introduksjon 24

3.1.1 Termisk nisje og optimal temperatur 24

3.1.2 Oksygenbegrensning ved høy temperatur 25

3.1.3 Sykdommer 26

3.1.4 Produksjonslidelser 27

3.1.5 Tidlig kjønnsmodning og bruk av steril fisk 28

3.1.6 Stor laks mer sårbar for høy temperatur 29

3.1.7 Seleksjon for klimarobust laks 30

3.1.8 Viser oppdrett i Tasmania fremtiden? 30

3.1.9 Oppsummering av oppdrettslaksens klimabiologi 30

3.2 Vurdering av klimaendringer på velferd 31

3.2.1 Redusert forutsetning for naturlig atferd 32

3.2.2 Dårligere forutsetning for et liv i oppdrett 32

3.2.3 Økt frekvens av stress og skader 33

3.2.4 Økt forekomst av sykdom 33

3.2.5 Dårlig vannmiljø 34

3.2.6 Feilernæring 35

3.3 Konklusjon 36

4 Effekter på vill laksefisk i et klimaperspektiv 38

4.1 Introduksjon 38

4.2 Smittespredning fra oppdrettet til vill laksefisk 40

4.2.1 Introduksjon 40

4.2.2 Virus 41

4.2.3 Bakterier 43

4.2.4 Parasitter 45

4.2.5 Fremmede agens og nye verter 47

4.2.6 Oppdrettslaks og vill laksefisk i et klima i endring 47

4.2.7 Oppsummering 48

4.3 Lakselus 49
4.3.1 Introduksjon 49
4.3.2 Vurdering av klimaendringer på lakselus 49
4.4 Rømt laks 52
4.4.1 Introduksjon 52
4.4.2 Vurdering av klimaendringer på rømt fisk 53
4.5 Konklusjon 57
5 Utslipp av næringssalter, organiske partikler, miljøgifter og legemidler i et klimaperspektiv 59
5.1 Introduksjon 59
5.2 Næringssalter, planteplankton og makroalger 59
5.2.1 Introduksjon 59
5.2.2 Vurdering av klimaendringer på næringssalter, planteplankton og makroalger 60
5.3 Partikulært organisk materiale 62
5.3.1 Introduksjon 62
5.3.2 Vurdering av klimaendringer på partikulært organisk materiale 63
5.4 Miljøgifter 65
5.4.1 Introduksjon 65
5.4.2 Vurdering av klimaendringer på miljøgifter 66
5.5 Legemidler 68
5.5.1 Introduksjon 68
5.5.2 Vurdering av klimaendringer på legemidler 69
5.6 Mikroorganismesamfunn i marine sediment 71
5.6.1 Introduksjon 71
5.6.2 Påvirkning av biocider, tungmetaller og legemidler fra akvakultur på mikrobiota 71
5.6.3 Kombinert påvirkning av klimaendringer og forurensning på sedimentmikrobiota 72
6 Oppsummering 73
6.1 Oppdrett i et fremtidig klima 73
6.2 Miljøeffekter i et fremtidig klima 74
6.3 Et økosystem i endring 75
6.4 Kunnskapshull 76
Referanser 79

1 - Introduksjon

Norsk oppdrettsnæring står akkurat nå overfor et veiskille der fremtidens havbruksforvaltning er under utvikling og dagens trafikklyssystem evalueres (ref. Meld. St. 24). Samtidig pågår det en stor teknologiutvikling i næringen for å møte endel av dagens miljøutfordringer. Når denne rapporten forsøker å se inn i glasskula og vurdere fremtidens utfordringer er det ikke et forsøk på å beskrive nøyaktig hvordan fremtidens havbruk vil se ut. Men heller skissere hvordan en mulig framtid kan bli dersom det ikke settes inn tiltak. Hovedmålet med rapporten er å gjøre næring og forvaltning oppmerksom på hvilke utfordringer klimaendringene kan bringe med seg, og dermed bidra til at det settes inn målrettede tiltak slik at denne skisserte fremtiden kan unngås.

I denne rapporten gir vi en oppsummering av kunnskapsstatus for en rekke effekter av klimaendringer og hvordan disse kan påvirke risiko for dårlig dyrevelferd og negative miljøeffekter av fiskeoppdrett i dagens form. Vurderingene bygger på temaene fra «Risikorapport norsk fiskeoppdrett» (Grefsrud et al., 2026; Grefsrud et al., 2025) og omfatter effekter på velferden til oppdrettsfisken, effekter på vill laksefisk (smittsomme virus, bakterier og parasitter og genetisk innkryssing) og effekter av utslipp fra oppdrett på miljøet (næringssalter, partikulært organisk materiale, miljøgifter og legemidler).

Vi tar utgangspunkt i risikokartene som er utviklet og beskrevet i tidligere rapporter, og vurderer hvordan klimaendringene som allerede er observert de siste 5-10 årene og forventes fram til 2050 påvirker disse. Basert på dagens status for norsk fiskeoppdrett, gjør vi en vurdering av hvorvidt de forventede klimaendringene vil endre sannsynligheten for at de ulike risikokildene, hendelsene og konsekvensene vil inntreffe. I fremtiden vil oppdrettsnæringen sannsynligvis benytte ulike typer produksjonsteknologi der enkelte vil være mer tilpasset til klimaendringene. En slik tilpasning vil påvirke sannsynligheten for at de ulike miljøeffektene inntreffer og graden av disse. Det jobbes med å utvikle ny teknologi, men det er for tidlig å si hvordan fremtidens fiskeoppdrett vil se ut. Vi tar derfor utgangspunkt i dagens situasjon der matfiskproduksjon i åpne merder i sjø er den vanligste formen for oppdrett.

Metodikken for risikovurdering er beskrevet i Grefsrud et al. (2026) og Andersen et al. (2022).

Både fysiske og kjemiske klimaendringer vil endre forutsetningene og de ytre rammene for fiskeoppdrett i åpne merder langs norskekysten. Det følger derfor en beskrivelse av hvilke endringer som er lagt til grunn i denne vurderingen i kapittel 2. De påfølgende kapitlene 3-6 går gjennom de ulike temaene (velferd til oppdrettsfisken, effekter på vill laksefisk og effekter av utslipp) med fokus på hvilke prosesser som blir påvirket av klimaendringer.

En viktig del av en slik vurdering er også å identifisere kunnskapshull. Det er mange usikkerheter knyttet til både fremtidens kystmiljø, fremtidig teknologiutvikling og videreutvikling innen havbruksforvaltningen (jmf Meld. St. 24 Fremtidens havbruk). På lang sikt, altså fram mot 2100, så er det usikkerhet i klimafremskrivninger på grunn av ulike utslippsscenarier og utviklingsveier for samfunnet. Dette handler hovedsakelig om samfunnet kommer til å lykkes med omstillingen til et lavutslippssamfunn, eller om andre samfunnsøkonomiske utfordringer gjør at utslippene av klimagasser fortsetter å øke. Innenfor den tidshorisonten som er valgt i denne rapporten, fram mot 2050, så er variasjonen mellom de ulike scenariene av mindre betydning. Fokus i denne rapporten vil derfor være på kunnskapshull knyttet til fiskevelferd, miljøeffekter av fiskeoppdrett og endringer i sårbarheten til arter som blir påvirket av fiskeoppdrett.

2 - Beskrivelse av fysiske og kjemiske klimaendringer

2.1 Oppsummering

Vi legger til grunn følgende fysiske endringer på kysten og inn i fjordene:

- Gjennomsnittlig temperaturøkning på 1 ° C i forhold til 1991-2020-nivå, sterkere temperaturøkning nær overflaten i sørlige halvdel av landet.
- Hyppigere hetebølger i forhold til 1991-2020-perioden.
- 0,1 - 0,2% årlig økning i nedbør/avrenning i forhold til 1991-2020 perioden. Økningen er størst høst, vinter og vår, og mindre på sommeren fra Sør-Norge til og med Trøndelag. Fra Nordland og nordover er økningen i avrenning mer jevnt gjennom året og i nordligste område størst på sommeren.
- Moderat reduksjon i saltholdighet på kysten (<0,05 fra 1961-1990 til 1991-2020) på 10 meters dyp. Større økning av brakkvannslag innover i fjordene.
- Hyppigere ekstremnedbør enn i 1991-2020 perioden.
- Reduksjon i oksygennivå i vannmassene ettersom varmere vann holder mindre oksygen (ca. 0,2 mg/L per ° C temperaturøkning).
- Ytterligere reduksjon av oksygen i bunnvannet i mange fjorder med grunn terskel (<100m) på grunn av redusert utskifting av bunnvannet.

Som følge av klimaendringene observerer man i norske fjorder i dag økt temperatur (både nær overflaten og i dypvannet), økt og endret ferskvannstilførsel fra elver. Mange fjorder opplever i tillegg lavere tilførsel av oksygen i bunnvannet under terskelnivå (Staalstrøm et al., 2025).

2.2 Globale trender i klimaendringer

Den viktigste konsekvensen av menneskelige storskala utslipp av klimagasser (karbondioksid - CO_2, metan - CH_4 og en rekke andre i mindre volum) er oppvarming av atmosfæren. På grunn av menneskelig aktivitet har lufttemperaturen allerede økt med i snitt 1,1 ° C siden førindustriell tid. Dette fører igjen til økt temperatur i havet, først i havoverflaten og nå også nedover i dypet. Temperaturen vil fortsette å øke globalt, både i luften og havet, hvor mye avhenger i stor grad av nivået av utslippsbegrensende tiltak nå og i de nærmeste tiårene. Den andre store påvirkningen på havet er at økte mengder CO_2 i atmosfæren endrer kjemien og skaper havforsuring.

2.2.1 FNs klimapanel (IPCC), utslippsscenarier og projeksjoner

IPCC kommuniserer det best mulige vitenskapelige grunnlaget for klimapolitikk ved å evaluere global klimaforskning og sammenstille de viktigste elementene. Dette foregår innenfor tre arbeidsgrupper på I) Fysisk klima, II) Konsekvenser, tilpasning og sårbarhet, og III) Tiltak for å redusere klimagassutslipp. Vurderingene presenteres hovedsakelig gjennom omfattende vurderingsrapporter ca. hvert 7. år. Her er vi i hovedsak interessert i resultatene fra arbeidsgruppe II og særlig den tilknyttede Spesialrapporten på hav og islagte områder (Bindoff et al., 2019). Generelle fakta om klimaendringer har vi, om ikke annet er sagt, hentet derfra.

Klimascenarier er et verktøy som brukes av IPCC for å studere og kvantifisere hvordan fremtidige utviklinger (typisk fram til år 2100) i stor grad avhenger av i hvilken grad vi i løpet av de kommende tiårene klarer å

redusere utslippene av klimagasser. Disse scenariene danner grunnlaget for fremtidige klimamodelleringer som utføres med globale klimamodeller. I IPCC sammenstilles klimamodelleringer fra ulike modellsystemer og disse kalles da CMIP-kjøringer (Coupled Model Intercomparison Project). Nåværende generasjon av CMIP-kjøringene som ble brukt i den sjette IPCC rapporten er i fase 6, altså CMIP6. Arbeidet med CMIP7 er allerede i gang og disse vil danne grunnlaget for neste klimarapport fra IPCC.

Graden av forventet oppvarming avhenger av to komponenter: i) fremtidige utslippsscenarier (Representative Concentration Pathways, RCP) og ii) beskrivelser av ulike utviklingsveier for samfunnet, inkludert faktorer som økonomisk vekst, befolkningsendringer, utdanning, teknologi og styring (Shared Socioeconomic Pathways, SSP). Disse sammensatte scenariene tar hensyn til både samfunnsøkonomiske utviklingsveier og tilhørende utslippsbaner. Scenarioene er SSP1-1.9 (svært lavt utslipp, forventet temperaturøkning < 1.5 °C), SSP1-2.6 (lavutslipp, ca 1.8 ° C), SSP2-4.5 (moderat, ca 2.7 °C), SSP3-7.0 (høyt, ca 3.6 °C), og SSP5-8.5 – ekstremt høyt, > 4.3 °C). Tallene i navnene på SSP-scenariene (1.9, 2.6 osv.) er ikke intuitive, de viser til mengden ekstra strålingspådriv i atmosfæren i år 2100, målt i watt per kvadratmeter, sammenlignet med førindustrielt nivå.

Her representerer for eksempel SSP1-2.6 et bærekraftig samfunnsøkonomisk scenario (SSP1) kombinert med et lavutslippsscenario (RCP2.6) en verden som gjør sterke anstrengelser for å redusere utslipp. I kontrast kombinerer et verst tenkelig scenario (SSP5-8.5) en samfunnsutvikling tungt basert på fossilt brensel (SSP5) med et høyt utslippsscenario (RCP8.5). De mest realistiske scenariene og de som brukes mest er SSP2-4.5 og SSP3-7.0.

2.2.2 Temperaturendringer

Havet har så langt fungert som en buffer mot klimaendringer. Havet, og særlig de øvre ca. 700 meterne, har tatt opp mer enn 60% av overskuddsvarmen (Bao et al., 2026) og omtrent 30–40 % av all menneskeskapt CO_2 som er sluppet ut i atmosfæren. Dette har til nå bidratt mye til å begrense effekten av klimaendringer i luft og på land. Nå begynner havet å bli «mettet» og klimaendringene påvirker det på mange måter, med omfattende og alvorlige konsekvenser for natur og mennesker. Endringene berører havets fysiske egenskaper (inkludert havtemperatur, havnivå, isdekke, havstrømmer og blandingslagets dybde) samt biogeokjemi (nivåer av oksygen og næringsstoffer, forsuring). Mange marine arter og økosystemer vil møte miljøforhold som ligger utenfor det de er tilpasset, og fremtidige konsekvenser forventes å bli betydelige (Bindoff et al., 2019).

Globalt har havet tatt opp mye varme og havtemperaturen har i gjennomsnitt økt med omtrent 0,6 °C siden 1950. Havet har blitt varmere i alle dyp, men økningen er klarest i de øvre 700 m. Oppvarmingen har akselerert de siste tiårene og varierer mellom havområdene, særlig pga. forskjeller i vindmønstre, utveksling med atmosfæren og havstrømmer.

2.2.3 Marine hetebølger

I tillegg til økt middeltemperatur fører klimaendringene til økt frekvens og intensitet av ekstremhendelser som marine hetebølger (MHB). MHB er perioder med kraftig økning i havtemperaturen. I Norge er en hetebølge i atmosfæren definert som fem eller flere sammenhengende dager der maksimumstemperaturen er 27 °C eller høyere. I havet derimot, er det store geografiske forskjeller i temperatur, noe som gjør en slik absolutt definisjon lite hensiktsmessig. Det finnes flere definisjoner, men en MHB blir oftest definert som 5 påfølgende dager med sjøtemperatur over 90 persentilen i en måleserie som strekker seg over 30 år (Hobday et al., 2016). Altså at temperaturen er høyere enn 90 prosent av måledataene i den perioden og det området vi studerer. Det vil si at en varmebølge i overflaten i sør om sommeren har høyere absolutt temperatur enn en varmebølge i nord eller i dypet. Og at tilstanden i havet også kan bli definert som en varmebølge om vinteren. En MHB kan beskrives ut fra varighet, intensitet, utviklingshastighet og geografisk utbredelse.

IPCC har, basert på mye litteratur, estimert at frekvensen av MHB har doblet seg globalt siden 1982 og at intensiteten også øker (Bindoff et al., 2019). Ulike marine hetebølger kan ha svært ulike egenskaper, men de kan påvirke organismer og økosystemer negativt, med potensielt vidtrekkende samfunnsøkonomiske konsekvenser.

2.2.4 Havforsuring og oksygeninnhold

Fram til år 2100 er direkte effekter av økte nivåer av karbondioksid og metan mm. i atmosfæren neppe et utbredt problem for terrestriske økosystemer eller menneskers helse. En større utfordring er det at økt atmosfærisk CO_2 vil, i tillegg til gjennom oppvarming, påvirke havet gjennom kjemiske endringer. Denne prosessen, havforsuring, foregår forenklet som følger. Når atmosfærisk CO_2 kommer i kontakt med havoverflaten, løses noe av det i vannet. Mer atmosfærisk CO_2 gir mer CO_2 i havoverflaten. Det oppløste CO_2 reagerer med vann og danner karbonsyre. Karbonsyre er ustabilt og en betydelig del spaltes til hydrogenioner (H+) og bikarbonat, og bikarbonat kan videre spaltes til karbonat. Flere frie H+ ioner gir (per definisjon) lavere pH. Denne utviklingen er allerede i gang og er uavhengig av oppvarmingseffekten. En potensielt alvorlig konsekvens er at skallbyggende organismer som koraller, skjell, kalkalger og plankton får problemer med å danne kalsiumkarbonat som de trenger for skall og strukturer. Disse organismene forventes derfor å bli mer sårbare for andre påvirkninger i et surere hav, inkludert mulige påvirkninger fra havbruk. Blant plankton er det særlig planteplankton av typen kalkflagellater som er utsatt, men også noen dyreplankton (f.eks. vingesnegl). Men det er fortsatt stor usikkerhet knyttet til konsekvenser for økosystemet og muligheter for enkelte arter å tilpasse seg et nytt miljø.

Oksygennivået i havet har siden ca. 1960 generelt gått ned i overflaten og ned til 1000 meters dybde (Bindoff et al., 2019). Det har vært størst nedgang i tropiske og subtropiske havområder. Endringene skyldes i stor grad oppvarming av havet, som reduserer oksygenløselighet, men også økt lagdeling, som kan begrense blanding av oksygenrikt overflatevann med dypere lag.

2.3 Klimaendringer i norske kyst og fjordområder

Når man går fra å vurdere globale klimaendringer til regionale og lokale trender må man i større grad ta hensyn til naturlig variabilitet i form av kjente klimamønstre. Det er noen regionale klimamønstre som har stor betydning for variasjonen i forholdene langs norskekysten. Disse kan være i atmosfæren eller i havet. Det mest kjente atmosfæriske mønsteret er den Nordatlantiske Oscillasjon (NAO) (Hurrell et al., 2003). Denne kan defineres som forskjellen i lufttrykk nær hav/jordoverflaten mellom lavtrykksområdet ved Island og høytrykket ved Azorene. Positiv NAO betyr stor trykkforskjell → sterke vestavinder → milde, våte vintre i Nord-Europa. Negativ NAO betyr liten trykkforskjell → svakere vestavinder → kaldere vintre i Nord-Europa. En kan lage enkle stasjonsbaserte indekser for NAO ved å beregne forskjeller mellom en bestemt værstasjon i nord (f.eks. i Reykjavik) og en lengre sør (f.eks. i Ponta Delgado på Azorene eller i Lisboa). Den lengste tidsserien går tilbake til 1864. En får et mer helhetlig bilde, men kortere tidsserie ved å bruke analyser av lufttrykksanomalier over hele Nord-Atlanteren. Den Arktiske Oscillasjon (AO) er mønster i lufttrykk over Arktis og midlere breddegrader. Den skiller seg altså fra NAO med ikke å være kun atlantisk, men sirkumpolar. Hovedmønstrene er likevel ofte dominert av variasjon på atlantisk side.

Når det gjelder strømmønstre i vår region er Golfstrømmen det de fleste er kjent med. Golfstrømmen er en overflatestrøm som frakter varmt, salt vann fra Mexicogulfen nordover langs USAs østkyst og videre mot Nord-Atlanteren. Denne fortsetter som den Nordatlantiske strømmen opp mot Norskehavet, og endrer navn til Den norske atlanterhavsstrømmen utenfor norskekysten. Strømmen fortsetter nordover og deler seg i to greiner utenfor Nord-Norge der en grein går inn i Barentshavet mens den andre fortsetter på vestsiden av Svalbard.

Den norske atlanterhavsstrømmen bringer varmt vann med høy saltholdighet inn til norskekysten og har dermed stor påvirkning på det lokale klimaet.

Samtidig er Golfstrømmen og Den norske atlanterhavsstrømmen en del av et sirkulasjonssystem som dekker hele Atlanterhavet, kalt Den atlantiske meridionale omveltningssirkulasjonen (Atlantic Meridional Overturning Circulation, AMOC). AMOC transporterer varme, salt og næringsstoffer mellom tropene og høyere breddegrader gjennom en overflatestrøm (Golfstrømmen), avkjøling og nedsynking av vannmasser i nord og en returstrøm i dypet tilbake til tropene og sørlige deler av Atlanterhavet. Dette systemet kalles også et transportbånd og har stor betydning for reguleringen av det globale klimaet. For å forstå konsekvensene av klimaendringene langs norskekysten så er det viktig å vite om AMOC vil bli påvirket i fremtiden. Hvis sirkulasjonssystemet svekkes kan det få store konsekvenser for Nord-Atlanteren i form av redusert varmetransport. De fleste klimamodeller viser at AMOC vil bli svekket i fremtiden (Ashton-Key et al., 2026), men det er usikkert hvor mye den blir svekket.

Unormalt høye eller lave temperaturer i den nordlige delen av Nord-Atlanteren kan gi grunnlag for prediksjon av temperatur i Barentshavet opptil 7 år i forkant. Dette skyldes at vannmassene i Nord-Atlanteren og Norskehavet beveger seg relativt sakte nordover mot Barentshavet. Slike anomalier i Nord-Atlanteren tar derfor flere år å overføre til Barentshavet, og dette gir grunnlag for å forutsi klimavariabilitet og tilhørende effekter på det marine økosystemet i Barentshavet med en rekke år (Årthun et al., 2018).

2.3.1 Temperaturendringer

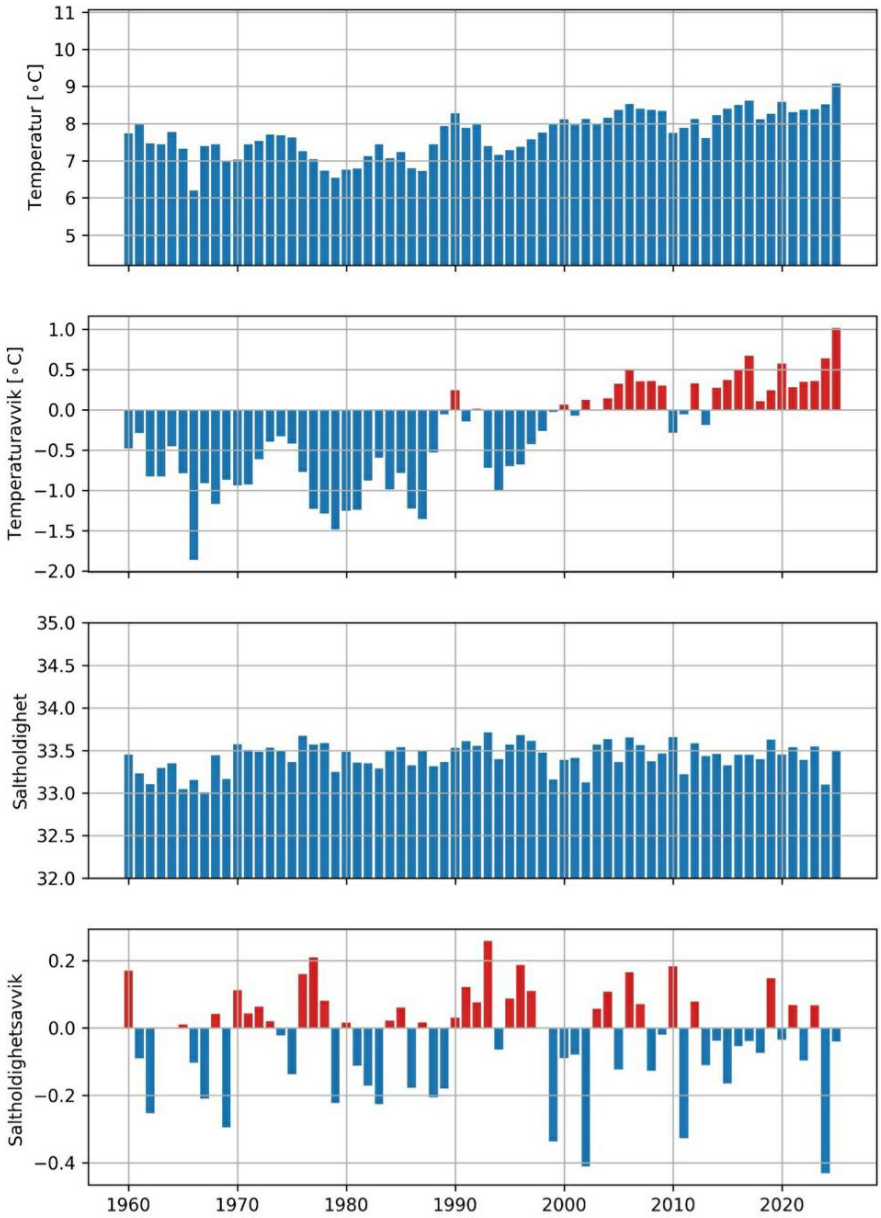
Vannet langs norskekysten består av to ulike vannmasser: Den norske kyststrømmen i de øvre vannlagene med relativt lav saltholdighet og Den norske atlanterhavsstrømmen med høyere saltholdighet under. Havforskningsinstituttet har overvåket saltholdighet og temperatur i disse vannmassene siden 1930-tallet på flere kyststasjoner (Fig. 2.1).



Figur 2.1. Havforskningsinstituttets overvåkningsstasjoner langs kysten.

Observasjoner fra kyststasjonene viser naturlige, store sesongvariasjoner i temperatur og saltholdighet (Fig. 2.2). Omfanget av disse variasjonene i kystvannet er større i Sør-Norge enn i nord. I tillegg til de markerte

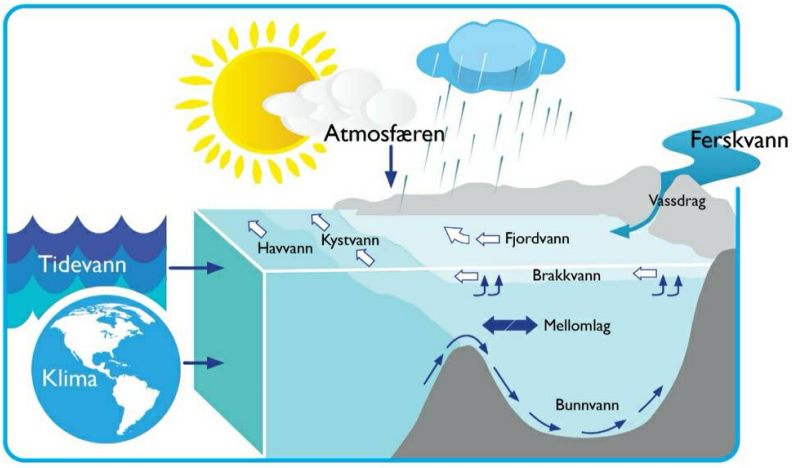
sesongsvingningene er det observert en langsiktig oppvarming av kystvannet de siste 60 årene. Fra perioden 1961–1990 til 1991–2020 har temperaturen økt mellom 0,5 og 1,0 °C ved alle kyststasjoner og på alle dyp. Ved de sørlige stasjonene (Lista, Utsira, Sognesjøen og Bud) var temperaturøkningen størst nær overflaten, mens ved de nordlige stasjonene (Ingøy og Eggum) var økningen jevnt fordelt på alle dyp.



Figur 2.2. Gjennomsnittstemperatur for alle kyststasjonene (Fig. 1) og for 1, 10, 50, 75 og 100m dyp (øverst). Temperaturavvik beregnet i forhold til perioden 1991-2020 (nest øverst). Gjennomsnittssaltholdighet for alle kyststasjonene (Fig. 1) og for 1, 10, 50, 75 og 100m dyp (nest nederst). Saltholdighetsavvik beregnet i forhold til perioden 1991-2020 (nederst).

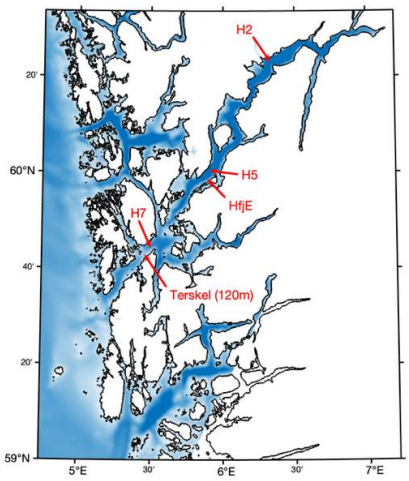
Inne i fjordene er vannmassene hovedsakelig delt inn i tre ulike vertikale lag (Fig. 2.3). Overflatelaget er sterkt påvirket av avrenning og har dermed store variasjoner i saltholdighet. Strømmen i dette laget er sterkt påvirket av vind som skifter i styrke og retning over kort tid. Gjennomsnittlig strøm over lang tid vil hovedsakelig rettet ut

av fjorden på grunn av trykkforskjellen som oppstår når ferskvann blir blandet med saltvann og danner brakkvann. Bunnvannet i fjorder er den delen av fjorden som har begrenset utveksling med kysten på grunn av en eller flere terskler. Bunnvannet kan derfor være relativt stillestående i lange perioder, bare avbrutt av korte og intensive innstrømningsepisoder. I fjorder med grunne terskler kan det gå mange år mellom innstrømningsepisodene. Mellom overflatelaget og bunnvannet finner vi det intermediære vannet, kalt mellomlaget. Sirkulasjonen i mellomlaget er hovedsakelig drevet av tetthetsforskjeller på kysten, og kan derfor være rettet både ut og inn av fjorden. Denne sterke koblingen til kysten gjør at vannmassene i stor grad gjenspeiler trendene som observeres på kysten.



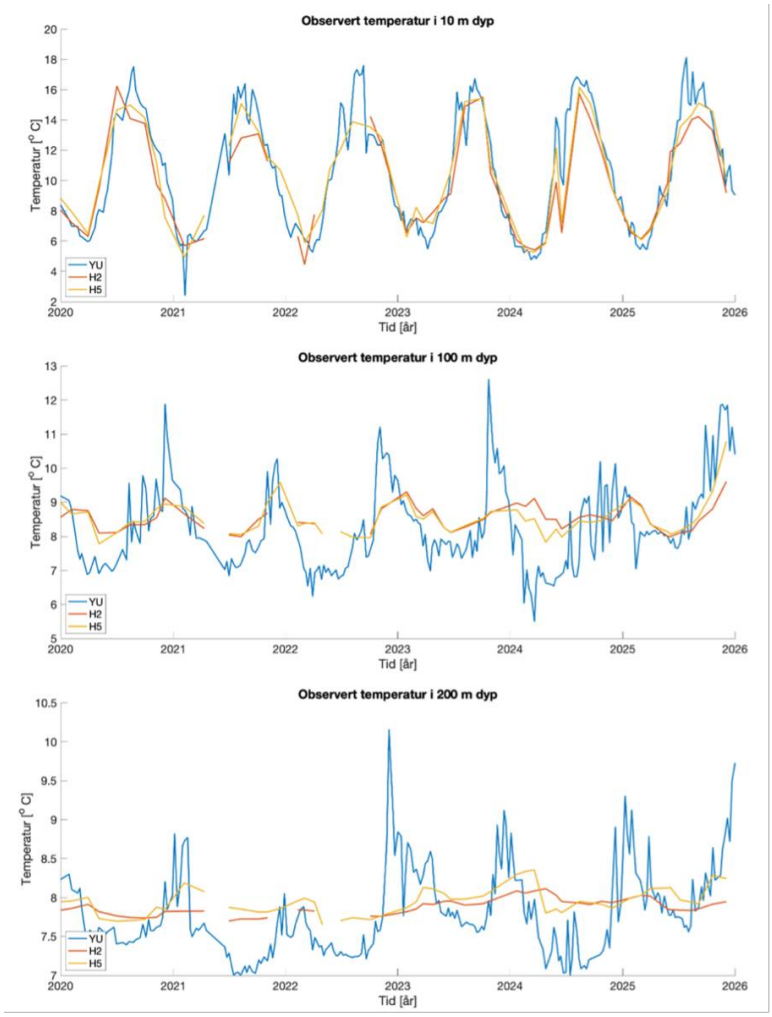
Figur 2.3. Skjematisk fremstilling av de ulike vannmassene i en fjord og hvordan ytre drivkrefter (ferskvann, atmosfæren, tidevann og klima) påvirker disse.

I Hardangerfjorden har vi gjennomført en langvarig overvåkning, og vi viser eksempler herfra. Sammenligner vi observasjoner mellom 2020 og 2026 fra den faste stasjonen på Ytre Utsira med stasjonene H5 og H2 inne i Hardangerfjorden (Fig. 2.4) finner vi både likheter og ulikheter.



Figur 2.4. Kart over Hardangerfjorden og posisjonen til overvåkingsstasjonene H2 og H5.

Fra stasjon H5 og videre inn fjorden vil det som regel være et velutviklet brakkvannslag med 1-10 m tykkelse. Dette laget med lavere saltholdighet er laget av ferskvannsavrenning fra elvene i fjorden og påvirkes lokalt. Under dette laget og ned til terskeldypet (~120 m) er det forholdsvis god vannutveksling mellom fjordvannet og kystvannet. I 10 m dyp er temperaturen nokså sammenfallende mellom kysten og hele fjorden. Dypere ned, ved 100 m og 200 m er sesongvariasjonene redusert inne i fjorden, og temperaturen inne i fjorden er mer lik middeltemperaturen av kystvannet. For saltholdighetens del vil verdiene være noe lavere inne i fjorden enn ved Ytre Utsira. Dette skyldes at brakkvannslaget bidrar med vertikalblanding av ferskvann lokalt.



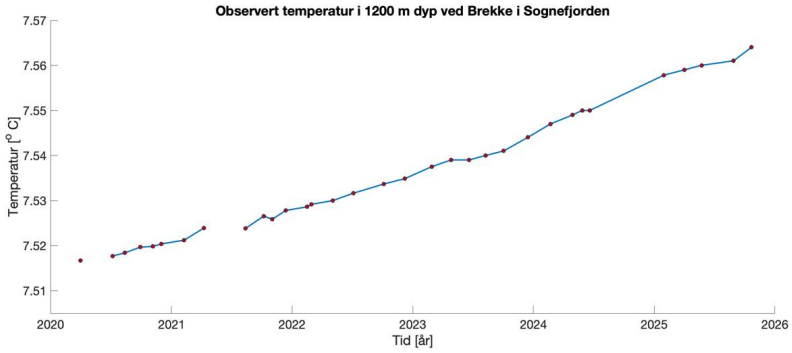
Figur 2.5. Observert temperatur på Ytre Utsira – blå (se Fig. 1), H2 – rød og H5 – oransje i Hardangerfjorden (se Fig. 2.4).



Figur 2.6. Observert saltholdighet på Ytre Utsira – blå (se Fig. 1), H2 – rød og H5 – oransje i Hardangerfjorden (se Fig. 2.4).

I overflaten er forholdene i større grad påvirket av lokale forhold sammenlignet med dypere ned (omtrent ned til terskeldypet) der vannutvekslingen med kystvannet betyr mye. Variasjon i nedbør og elveavrenning vil påvirke saltholdigheten, og responsen kommer i løpet av timer til dager. I kalde perioder om vinteren kan også de innerste fjordarmene islegges.

Selv i de dypeste bassengene i fjordene foregår det en sakte klimaendring. De siste årene er det observert en jevn temperaturøkning i flere dype basseng i de store fjordene på Vestlandet. Figur 2.7 viser observasjonene fra 1200m dyp ved Brekke i Sognefjorden. Selv om variasjonene her er små, så viser resultatene en jevn temperaturstigning.

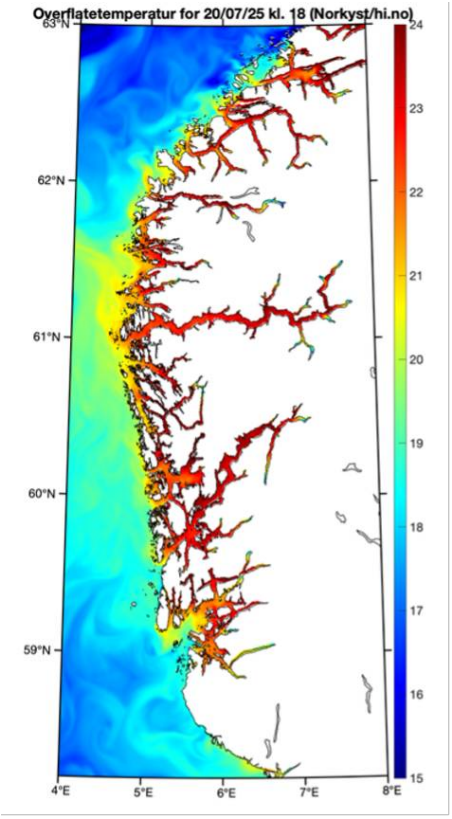


Figur 2.7. Observert temperatur på 1200 m dyp i Sognefjorden.

2.3.2 Marine hetebølger

I perioder med høye temperaturer oppstår det oftere marine hetebølger (MHBer). På grunn av klimaendringene opptrer MHBer oftere i dag enn før. De er i tillegg mer ekstreme enn før , dvs. at de har høyere temperaturavvik, økt hyppighet, og lengere varighet. Alvorlighetsgraden av disse hendelsene har økt globalt de siste tiårene og forventes å øke ytterligere. Disse ekstreme hendelsene kan ha store økologiske og sosioøkonomiske konsekvenser, inkludert endringer i artsutbredelse, massedød av tareskoger, og økt dødelighet eller redusert ytelse hos oppdrettsarter. Dette må ses i sammenheng med forbedret forhold for noen arter. Til eksempel er det modellert og observert økende smittepress fra lakselus med økende temperatur.

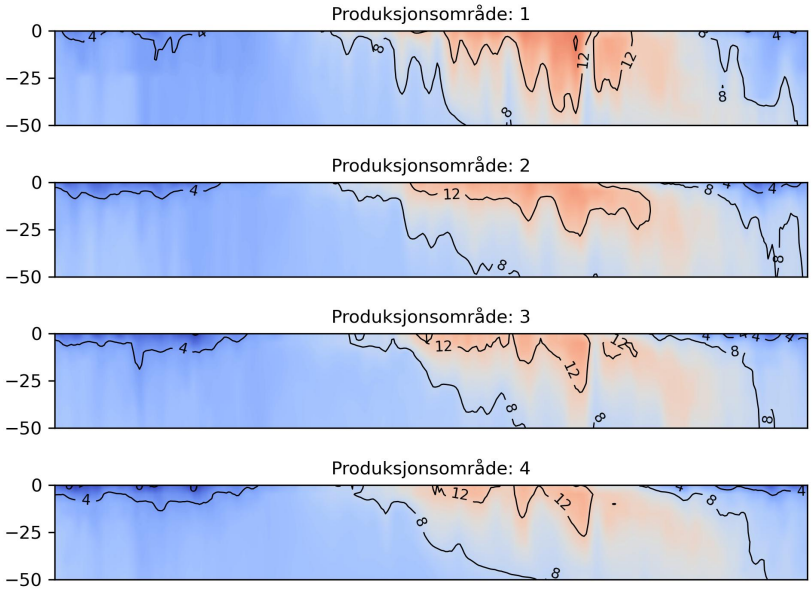
De siste årene har hyppigheten av MHB økt også langs norskekysten. Temperaturen i de øverste par meterne kan bli høye i perioder med klart og relativt vindstille vær, noe vi så eksempler på sommeren 2024 i Nord-Norge (Gonzalez et al., 2025) og sommeren 2025 på Vestlandet. På den varmeste dagen sommeren 2025 på Vestlandet ble det målt over 25 ° C ved Øystese. Samme dag ble det målt 18,7 ° C på Ytre Utsira som også er høyeste målte temperatur der, men altså 6 ° C lavere temperatur enn inne i fjorden. Det varme overflatevannet kan tydelig ses i resultater fra Norkyst800 hvor vi f.eks. kan se temperaturforskjell mellom ytre kyst og innaskjærs (Fig. 2.8). Slike episoder med varmt vann er et typisk klimasignal.

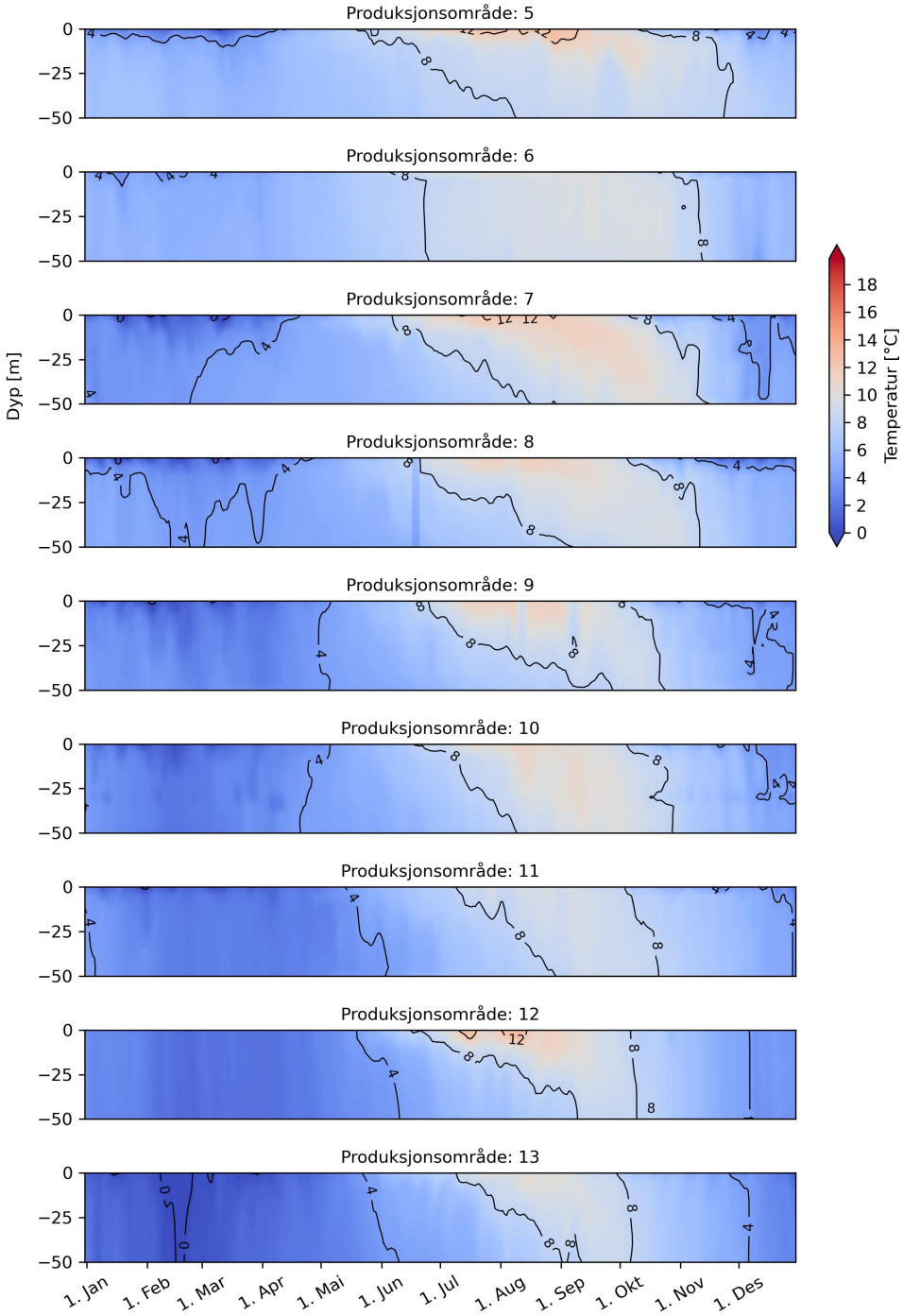


Figur 2.8. Overflatetemperatur fra modellen Norkyst langs kysten av Vestlandet 20.juli 2025.

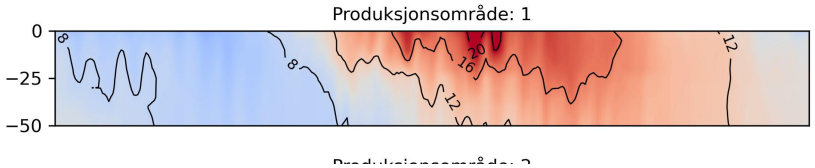
2.3.3 Miljøforhold på lokalitetene

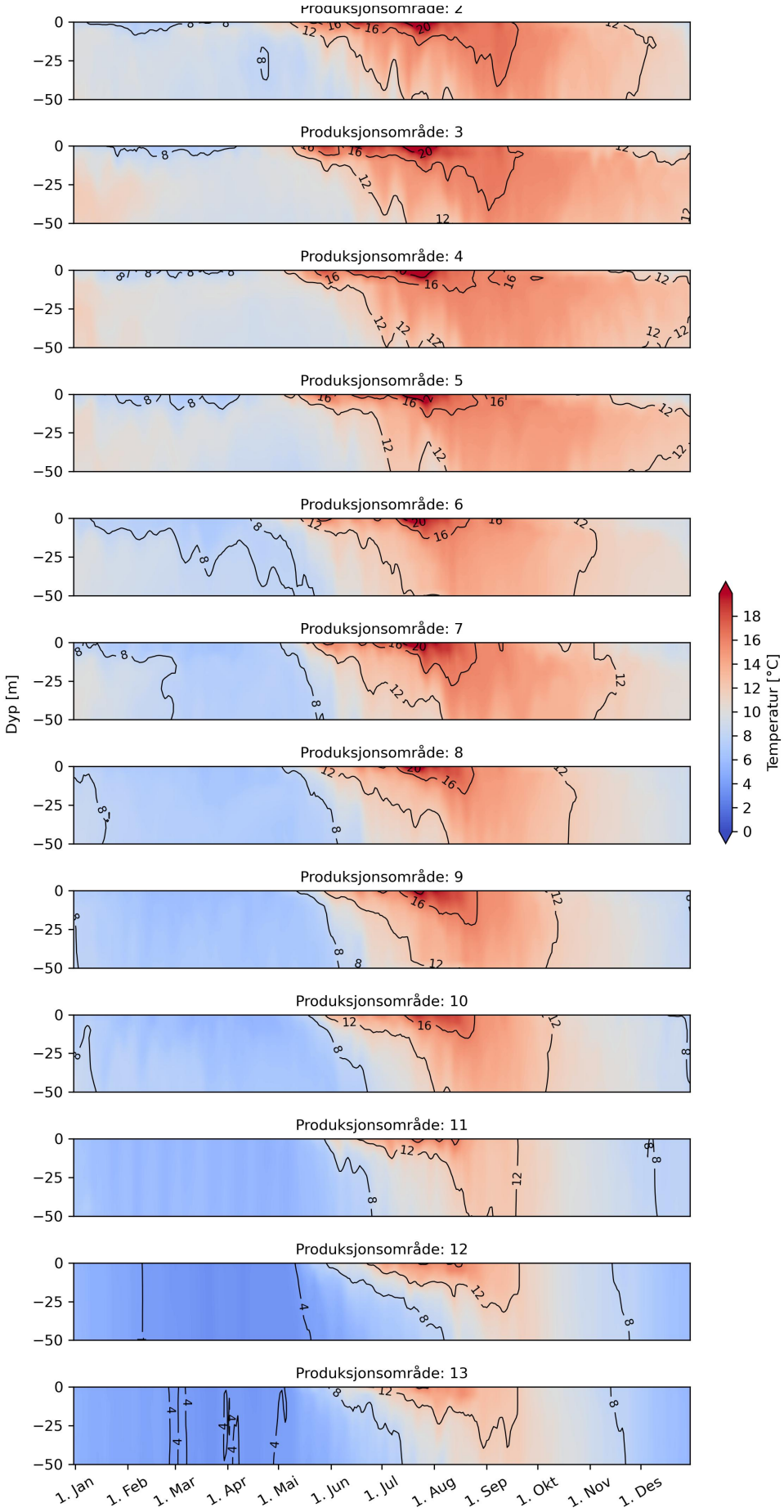
Figur 2.9 viser gjennomsnittlig temperatur fra modellen Norfjord med 160 meters horisontale oppløsning på alle oppdrettslokaliteter i de ulike produksjonsområdene fra de siste 5 årene (fra og med 2020 til og med 2025), og figur 2.10 viser maksimumstemperaturen i løpet av en dag for samme periode. Maksimumstemperaturer reflekterer de marine hetebølgene som inntraff i 2024 og 2025 i nord og i sør .





Figur 2.9. Gjennomsnittstemperatur fra modellen Norfjord160 de siste 5 årene (2020 tom 2025) fra alle oppdrettslokaliteter i de ulike produksjonsområdene (i akvakulturregisteret mars 2026).




Produksjonsområde: 2
Produksjonsområde: 3
Produksjonsområde: 4
Produksjonsområde: 5
Produksjonsområde: 6
Produksjonsområde: 7
Produksjonsområde: 8
Produksjonsområde: 9
Produksjonsområde: 10
Produksjonsområde: 11
Produksjonsområde: 12
Produksjonsområde: 13
Dyp [m]
0
−25
−50
1. Jan
1. Feb
1. Mar
1. Apr
1. Mai
1. Jun
1. Jul
1. Aug
1. Sep
1. Okt
1. Nov
1. Des
Temperatur [°C]
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18

Figur 2.10. Maksimumstemperatur fra modellen Norfjord160 ila de siste 5 årene (2020 tom 2025) på alle oppdrettslokaliteter i de ulike produksjonsområdene (i akvakulturregisteret mars 2026).

2.3.4 Nedbør og avrenning

Klimaendringer har generelt ført til økt avrenning, endret sesong på avrenningen og hyppigere episoder med ekstremnedbør (Bindoff et al., 2019). Ser vi på hele Norge under ett har nedbøren økt med omtrent 21 % fra 1901 til 2024 og med omtrent 7 % fra perioden 1961–1990 til 1991–2020. Mye av økningen de siste 60 årene skyldes menneskeskapt global oppvarming (Dyrrdal et al., 2025). Det er imidlertid store geografiske forskjeller og i perioden 1991–2020 varierte beregnet årsnedbør fra 212 mm i Saltdal i Nordland til 6130 mm ved Ålfotbreen i Vestland fylke (Tveito, 2021).

Ifølge IPCC kommer episoder med ekstremnedbør hyppigere og med større intensitet i et varmere klima. Dette vil episodisk føre til stor tilførsel av næringssalter og både organisk og uorganisk materiale fra land som bidrar til formørkning av kystvannet, samt ferskvann som igjen vil føre til redusert saltholdighet i overflatevannet. Det er vist at vannet langs kysten i Norge er blitt mørkere hovedsakelig på grunn av endring i tilførsel av farget løst organisk materiale fra land, noe som fører til at lyset svekkes raskere nedover i vannsøylen (Opdal et al., 2023). Lysnivået i havet påvirker det marine næringsnettet, hvor mørkere vann favoriserer ikke-visuelle predatorer (som maneter) fremfor fisk som trenger synet for å spise (Opdal et al., 2023).

Ferskvannsavrenning vil også påvirke lagdelingen i vannmassene, og blandingen av vannmasser vertikalt. Økt/sterkere lagdeling vil derfor kunne redusere tilførsel av næringssalter fra dypere vannmasser og forsterke oppvarming fra atmosfæren. Etter 1990 har saltholdigheten gått ned ved de fleste stasjoner og dyp (Johnsen et al., 2024). Reduksjonen i saltholdighet var størst i de øvre vannlagene og større på de sørlige stasjonene i forhold til de i nord. Ved de sørlige stasjonene Lista, Sognesjøen og Bud ble det imidlertid observert en svak økning i saltholdighet på 50 og 100 meters dyp.

Tettheten på vann er avhengig av både saltholdighet og temperatur. Med økende temperaturer og synkende saltholdighet har den gjennomsnittlige tettheten i vannet gått ned ved alle kyststasjonene og på alle dyp fra perioden 1961–1990 til 1991–2020 (Johnsen et al., 2024). Tettheten ble redusert selv der det ble observert en økning i saltholdighet i kystvannet. På 10 meters dyp bidro endringene i både saltholdighet og temperatur like mye til tetthetsreduksjonen. Under 10 meter var temperaturøkningen den viktigste årsaken til reduksjonen. Tettheten gikk mer ned ved de sørlige kyststasjonene (Lista, Utsira, Sognesjøen og Bud) enn ved de nordlige kyststasjonene (Ingøy og Eggum).

2.3.5 Utskiftning av bunnvann i terskelfjorder

Fjordene i Norge er dype sammenlignet med kontinentalsokkelen. Fjorder flest er kjennetegnet av en terskel nær munningen. Denne terskelen hindrer direkte utveksling mellom fjordbassengets vann under terskeldypet og vannet på kysten. Derfor er fjordbassengets vann ofte en relativt stillestående vannmasse sammenlignet med fjordvannet over terskeldypet.

Dette stillestående vannet i fjordbassengene byttes ut periodevis når tungt vann blir løftet opp ved kysten. Slike utskiftinger drives av store vindsystemer og representerer den viktigste tilførselen av oksygen til dypvannet i mange norske fjorder. På grunn av den reduserte tettheten på kystvannet, som ble beskrevet over, opptrer utskiftingsepisodene ikke like ofte som før (Aksnes et al., 2019; Johnsen et al., 2024).

2.3.6 Stormaktivitet

Vindklimaet i Norge har endret seg lite fra 1991 til 2020, men middelvinden er noe redusert i Troms og Finnmark (Dyrrdal et al., 2025). Framskrivninger viser en svak reduksjon i middelvind og kraftig vind, men noe økning i de mest ekstreme vindene. Endringene er likevel små i forhold til naturlige variasjoner.

I et fremtidig varmere klima forventes vindmønstre og stormbaner å endres som følge av temperaturkontraster mellom tropene og Arktis. I stratosfæren blir denne kontrasten større, mens nær bakken blir den mindre. Dette endrer trykk- og vindbalansen i atmosfæren, og den polare jetstrømmen og vestavindene forventes i gjennomsnitt å forskyves mot polene. Varmere luft holder også på mer vanndamp, mer latent varme frigjøres i stormene, og de kraftigste stormene blir ofte sterkere. I Nord-Atlanteren forventes det derfor mer nedbør, samt kraftigere høst- og vinterstormer, men usikkerheten er stor.

2.3.7 Klimaprojeksjoner

Sandø et al. (2024) gjennomførte en risikoanalyse av norske havområder og vurderte både direkte og indirekte konsekvenser av framtidige klimaendringer på marine økosystemer under ulike fremtidige klimagassutslippsscenarier frem mot 2100. Analysen har hatt særlig søkelys på nøkkelarter innen plankton, fisk og skalldyr. Metoden kombinerer modellering og kunnskap om sensitivitetsegenkaper til ulike arter for å vurdere hvordan klimaendringer påvirker marine bestander i de tre norske forvaltningsområdene Nordsjøen, Norskehavet og Barentshavet. Modelleringen bestod av dynamisk nedskalering av tre ulike klimascenarier til norske havområder (temperatur, salt og sjøis), samt økosystemmodellering for biogeokjemiske endringer (oksygen og pH, primær- og sekundærproduksjon).

De svakeste temperaturtrendene er i Nordsjøen, og da spesielt ved kysten, mens de sterkeste trendene er i Barentshavet som er sterkt dominert av vannet som kommer fra Norskehavet i tillegg til redusert albedoeffekt (hvor mye sollys en overflate reflekterer) som følge av mindre sjøisdekke. Den sterkeste effekten av global oppvarming sees i SSP5-8.5-scenarioet der overflatetemperaturene mot slutten av det 21. århundret skiller seg sterkt ut fra de andre scenariene, med overflatetemperaturøkninger i de nordlige deler av Barentshavet på opptil 2,6±0,9 °C i mars og 4,5±1,5 ° C i juli. Det reduserte sjøisdekket i Barentshavet bidrar til at de største positive trendene i planktonproduksjon finner sted der. I Norskehavet er disse produksjonstrendene bortimot nøytrale, mens produksjonstrendene i Nordsjøen er svakt negative i takt med økt temperatur.

Tabell 2.1. Endring i marstemperatur (° C) og standardavvik (SD) for perioden 2015-2100 for scenario SSP2-4.5, for hele norskekysten delt inn i tre ulike områder; Nordsjøen kyst (sør for Stadt), Norskehavet kyst (mellom Stadt og Lofoten), Barentshavet kyst (nord for Lofoten) og for overflatetemperatur (SST), 100m dyp og på bunn. Utdrag fra Sandø et al. (2022).

	SST	100m	Bunn
Nordsjøen kyst	0,52±0,81	0,53±0,53	0,46±0,49
Norskehavet kyst	0,29±0,41	0,34±0,40	0,30±0,37
Barentshavet kyst	0,76±0,54	0,88±0,58	0,80±0,54

3. Velferd til norsk oppdrettslaks i et klimaperspektiv

3.1 Introduksjon

Klimaendringer vil påvirke fiskevelferden i norsk akvakultur på flere måter, men først og fremst gjennom endringer i oppdrettsmiljøet i den marine vekstfasen. Hetebølger og andre ekstreme værhendelser kan forårsake mulig katastrofale effekter på fiskevelferden hos oppdrettsfisk. Tilpasning til truslene fra klimaendringer vil derfor være en kontinuerlig utfordring for norsk akvakultur i de kommende tiårene.

For å forutsi hvordan klimaendringer vil påvirke akvakulturproduksjon og fiskevelferd, må vi først forstå den termiske biologien til fiskeartene som oppdrettes. Fisk er ektoterme (vekselvarme) dyr, noe som betyr at de har samme kroppstemperatur som omgivelsene. Derfor øker fiskens kroppstemperatur når vanntemperaturen øker. Dette er viktig fordi temperaturen direkte påvirker funksjonaliteten til alle biokjemiske, immunologiske og fysiologiske funksjoner (Fry, 1971; Scholander et al., 1953). All fisk er derfor tilpasset til å trives innenfor visse temperaturområder. Hvis det blir for kaldt eller for varmt, vil de begynne å få problemer.

Atlantisk laks (*Salmo salar*) er den viktigste arten i norsk akvakultur, og det følgende kapitelet vil derfor sette søkelys på denne arten. Andre oppdrettsarter av relevans for norsk akvakultur, som regnbueørret (*Oncorhynchus mykiss*), kveite (*Hippoglossus hippoglossus*) og torsk (*Gadus morhua*), vil ha sine egne artsspesifikke termiske toleransegrenser.

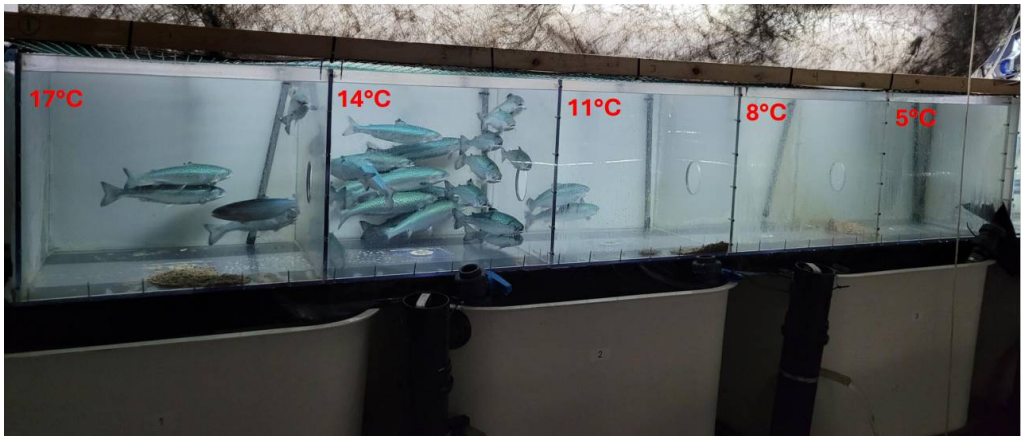
3.1.1 Termisk nisje og optimal temperatur

Effekten av varierende temperaturer på mange forskjellige biologiske funksjoner har blitt grundig studert hos oppdrettslaks gjennom årene. Vi har derfor solid grunnleggende kunnskap om gunstige temperaturer samt konsekvensene av ugunstige temperaturer for denne arten. Imidlertid er noen viktige aspekter ved laksens klimabiologi fortsatt dårlig forstått og vil kreve videre forskning i årene som kommer.

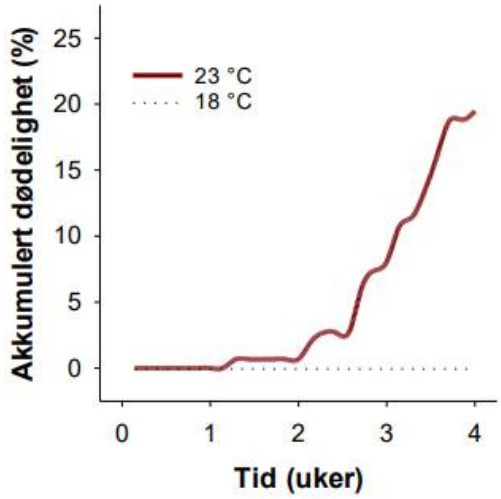
I sitt naturlige geografiske utbredelsesområde kan Atlantisk laks oppleve store temperaturvariasjoner fra 0–3 °C om vinteren i nord til over 20 °C om sommeren lenger sør. Som et resultat har laksen tilpasset seg en relativt bred og fleksibel termisk nisje der den kan overleve.

For best mulig akvakulturproduksjon og fiskevelferd foretrekkes vanligvis det midtre området i denne termiske nisjen. For eksempel er veksten høyest hos postsmolt ved 10–14 °C (Fraser et al., 2025; Handeland et al., 2003; Handeland et al., 2008), men hvis vanntemperaturen når 18–19 °C, begynner appetitt og vekst å avta betydelig (Hevrøy et al., 2013; Hevrøy et al., 2012; Kullgren et al., 2013), og over 20 °C mister laksen appetitten fullstendig (Wade et al., 2019). Dessuten er både størrelse på fisken og selve varigheten på den varme perioden avgjørende for hvordan fisken tilpasser seg, og hvilke konsekvenser det får for appetitt og vekst. Stor laks er generelt mere følsom for høy temperatur og får raskere lavere appetitt og redusert vekst, mens mindre laks bedre kan tåle perioder med høy temperatur. Når laksen selv kan velge, er det observert at post-smolt laks vanligvis unngår miljøer over 17 °C (Johansson et al., 2009; Lacroix, 2013) (Fig. 3.1).

Hvis temperaturen stiger over 22 °C i lengre perioder, begynner fisken å dø (Gamperl et al., 2020; Hvas, Folkedal, et al., 2017). For eksempel har vi sett at 20 % av laksen døde i løpet av en 4-ukers periode ved 23 °C (Fig. 3.2). Generelt kan vi derfor konkludere med at vanntemperaturen i oppdrettsmiljøet ideelt sett bør holde seg under 16–18 °C mesteparten av tiden, og at sommertemperaturene ikke bør overstige 20 °C i lengre perioder ned gjennom vannsøylen.



Figur 3.1. Foretrukket temperatur. Post-smolt Atlantisk laks i preferanseakvarier ved Matre forskningsstasjon. Fisken kan frivillig svømme frem og tilbake mellom hvert akvarium, og deretter velge hvor den vil være. Temperaturen i de fem akvariene er indikert på fotoet. Vi ser at de fleste fiskene velger 14 °C, og unngår de laveste temperaturene helt. Fotograf: Malthe Hvas, Havforskningsinstituttet.

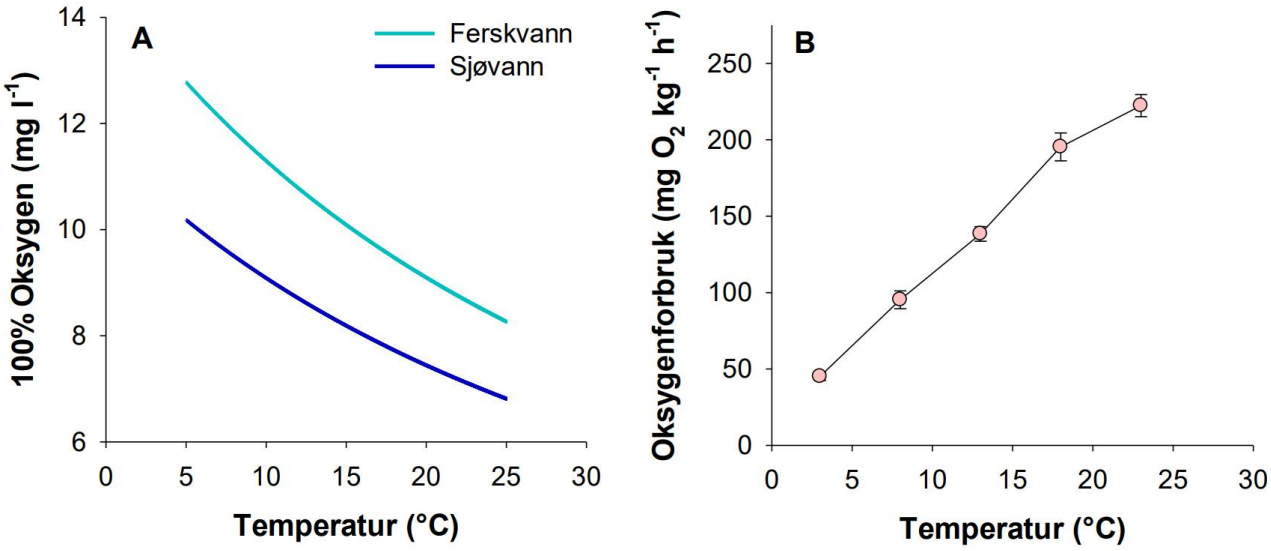


Figur 3.2. Kroniske terskelverdier for høy temperatur hos Atlantisk laks. Den gradvise akkumulerte dødeligheten hos post-smolt laks (0,5 kg) holdt ved 18 °C eller 23 °C i 4 uker (modifisert fra Hvas, Folkedal, et al. (2017)).

3.1.2 Oksygenbegrensning ved høy temperatur

Stigende vanntemperaturer utgjør en annen utfordring for vannlevende organismer på grunn av de fysiske egenskapene til oksygenløselighet i vann. Oksygenløseligheten avtar når vannet varmes opp, og sjøvann inneholder mindre oksygen enn ferskvann (Fig. 3.3A). Samtidig øker laksens oksygenbehov (et mål for stoffskiftet – fisken sitt energiforbruk) betydelig med økt temperatur, fordi det er mer energikrevende for vekselvarme dyr å eksistere i et varmere klima (Fig. 3.3B). På denne måten har høye temperaturer en synergistisk negativ effekt på fisk, ettersom fisk vil trenge mer oksygen for å dekke et økt stoffskifte mens mindre oksygen er tilgjengelig. Et økt stoffskifte vil også påvirke fiskens ernæringsbehov, ved at en større andel av energien går til vedlikehold fremfor vekst. Økt metabolsk aktivitet kan videre føre til økt oksidativt stress i organer (Waagbø et al., 2020), noe som kan øke behovet for antioksidanter i f ôr et (Yin et al., 2024).

I det marine oppdrettsmiljø vil perioder med forhøyede temperaturer øke sannsynligheten for hypoksi (dårlige oksygenforhold), spesielt hvis vannutskiftningen er lav og biomassen er høy. Laks er mer følsom for hypoksi ved høyere temperaturer, hvor selv moderat oksygen reduksjon raskt vil svekke appetitt og vekst (Remen et al., 2016). Nyere studier viser også at redusert oksygentilgjengelighet i oppdrettsmiljøet kan føre til lavere fôropptak og redusert vekst, selv om fôrutnyttelsen i mindre grad påvirkes ved 12 °C enn ved 17 °C (Liland et al., 2026; Vikeså et al., 2017). Andre viktige aktiviteter og funksjoner som krever energi, som svømming, immunresponser og stressmestring, blir også redusert under varmere og mer hypoksiske forhold (Hvas, 2022; Thomsson et al., 2025). Ved ekstreme hypoksiske forhold kveles laksen (Hvas et al., 2026; Skagseth et al., 2025). Den primære bekymringen med klimaendringer og hetebølger er derfor ikke bare den isolerte effekten av høyere vanntemperaturer, men den kombinerte synergistiske effekten med lavere oksygentilgjengelighet.



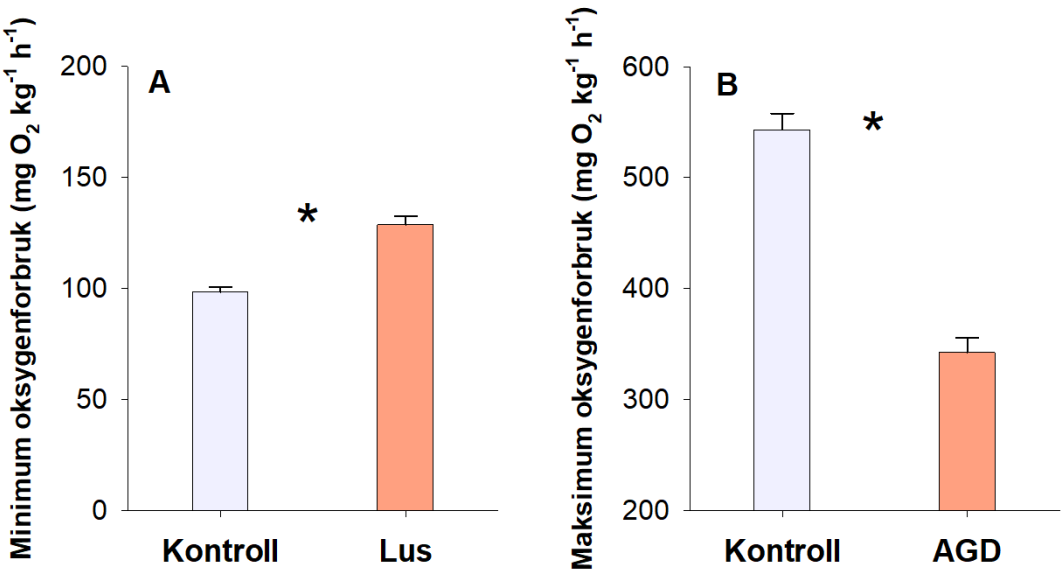
Figur 3.3. Oksygen i vannmiljøet og oksygenbehovet til laks. Panel

*Panel **A** viser løseligheten av oksygen (O_2) i ferskvann og saltvann (34 ppt) ved forskjellige temperaturer. Ved høyere temperaturer er det mindre oksygen i vannet, og det er mindre oksygen i saltvann enn i ferskvann. Panel **B** viser oksygenforbruket som et mål for stoffskiftet i hvile hos post-smolt Atlantisk laks holdt ved forskjellige temperaturer. Laks øker oksygenbehovet betydelig under hvile når temperaturen øker (modifisert fra Hvas, Folkedal, et al. (2017)).*

3.1.3 Sykdommer

Effektene av eksisterende sykdommer i lakseoppdrett forventes å være mer alvorlige ved forhøyede ugunstige temperaturer, fordi fisken allerede er mer energetisk begrenset på grunn av høyere stoffskifte og lavere oksygentilgjengelighet i miljøet. For eksempel øker infeksjon av lakselus oksygenbehovet under hvile, mens amøbegjellesykdom (AGD) reduserer den maksimale kapasiteten for oksygenopptak (Hvas & Bui, 2022; Hvas, Karlsbakk, et al., 2017) (Figur 3.4). I begge eksemplene forårsaker parasittene at laksen har lavere aerob kapasitet ved enten å øke forbruket i hvile eller redusere maksimal kapasitet under høy aktivitet. Hvis oppdrettsmiljøet også blir varmere og har lavere oksygenmetning, blir fiskens aerobe kapasitet enda dårligere. Parasittene har dermed en negativ synergi i fremtidens klima i forhold til fiskens velferd. Infisert og syk fisk forventes derfor å bli mer svekket både av høyere temperatur og lavere oksygennivåer, og derfor å ha

ytterligere reduserte miljøterskler for høy temperatur og hypoksi, og generell enda lavere robusthet mot stress. Samtidig tyder det på at immunforsvarets funksjonalitet hos post-smolt laks er relativt upåvirket av temperaturer opptil 20 °C og moderat hypoksi (Zanuzzo et al., 2020).



Figur 3.4. Effekter av lus og gjelleamøber på laksens oksygenforbruk. Panel A viser oksygenforbruk i hvile hos Atlantisk laks med og uten lus. Den infiserte fisken hadde i gjennomsnitt 36 mobile lus på seg (0,56 lus g -1), noe som resulterte i høyere energiforbruk under hvile. Panel B viser maksimal kapasitet for oksygenforbruk hos Atlantisk laks med og uten amøbisk gjellesykdom (AGD). I begge eksemplene forårsaker parasittene at laksen har lavere aerob kapasitet ved enten å øke forbruket i hvile eller redusere maksimal kapasitet under høy aktivitet. Hvis oppdrettsmiljøet også blir varmere og har lavere oksygenmetning, blir fiskens aerobe kapasitet enda dårligere. Parasittene har dermed en negativ synergi i fremtidens klima i forhold til fiskens velferd. Stjernen indikerer statistisk forskjell mellom gruppene. Modifisert fra Hvas, Karlsbakk, et al. (2017) og Hvas and Bui (2022).

3.1.4 Produksjonslidelser

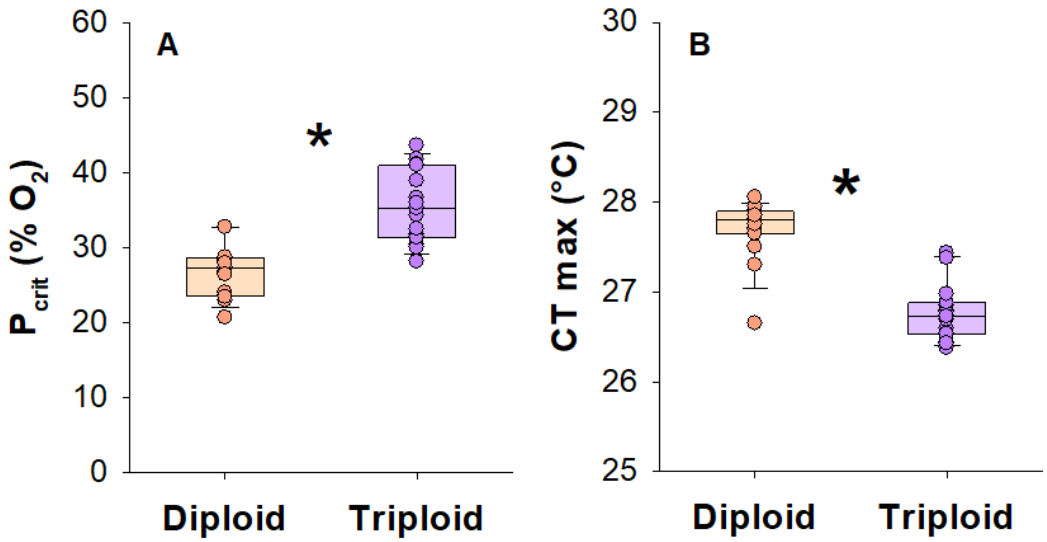
Ved høy temperatur øker også sannsynligheten for at laks utvikler flere ikke-infeksiøse produksjonslidelser (Waagbø et al., 2020) (Fig. 3.5). Særlig er økt mottakelighet for katarakt (grå stær) ved forhøyede temperaturer vist både i ferskvann (Sambraus et al., 2017), i perioden rett etter overføring til sjøvann (Waagbø et al., 2010), for større post-smolt (Fraser et al., 2025), samt for stor laks som opplevde en naturlig økning i sjøtemperaturen over sommeren (Remø et al., 2014; Waagbø et al., 2010). Katarakt er en sammensatt lidelse, og det kan være flere underliggende årsaker til kataraktutvikling ved høy temperatur, for eksempel effekter på vannbalansen i linsen og oksidativt stress (Remø et al., 2017). Kataraktutvikling er historisk sett forbundet med mangel på en rekke næringsstoffer, men er spesielt assosiert med for lave nivåer av aminosyren histidin i fôret (Remø et al., 2014). Ved høyere temperaturer trengs det mer histidin i fôret for å minimere katarakt (Sambraus et al., 2017; Waagbø et al., 2010). Økt sannsynlighet for kataraktdannelse i oppdrettslaks er derfor en betydelig velferdsrisiko i et fremtidig varmere klima. Høyere sjøtemperatur kan også føre til økt forekomst av beindeformiteter (Fjelldal et al., 2012; Philip et al., 2023). Per i dag mangler vi fremdeles betydelig kunnskap om samspillet mellom livsstadier, ernæringsbehov, og tilhørende grenseverdier for ugunstig temperatureksponering på ulik tidsskala i forhold til kataraktdannelse og andre produksjonslidelser.



Figur 3.5. Risiko for dannelse av katarakter i oppdrettslaks øker på høy temperatur. Bildet viser laks med alvorlig katarakt (fotograf: Sofie Rem ø).

3.1.5 Tidlig kjønnsmodning og bruk av steril fisk

En annen utfordring ved høyere temperaturer er økt forekomst av tidlig kjønnsmodning hos oppdrettsfisken. Dette resulterer i både dårligere produksjonskvalitet og dårligere fiskevelferd. For å unngå tidlig kjønnsmodning kan triploid laks som er steril brukes. Triploid laks er imidlertid mindre tolerant for forhøyede temperaturer og hypoksi, og står også overfor utfordringer med en rekke andre velferdsproblemer (Hansen et al., 2015; Hvas et al., 2026; Rimstad et al., 2023) (Fig. 3.6). Klimaendringer vil derfor ytterligere redusere potensialet for bruk av triploid laks i norsk akvakultur. Bruk av steril oppdrettslaks kan løse problemet med rømt oppdrettslaks som reproduserer i naturen, og det pågår forskning ved bruk av andre bioteknologier for å produsere en steril laks, som ikke får betydelig redusert velferd i norske oppdrettsmiljøer. Et eksempel på dette kunne være bruk av nye teknologier til genredigering, som gjør fisken steril (Kleppe et al., 2022).

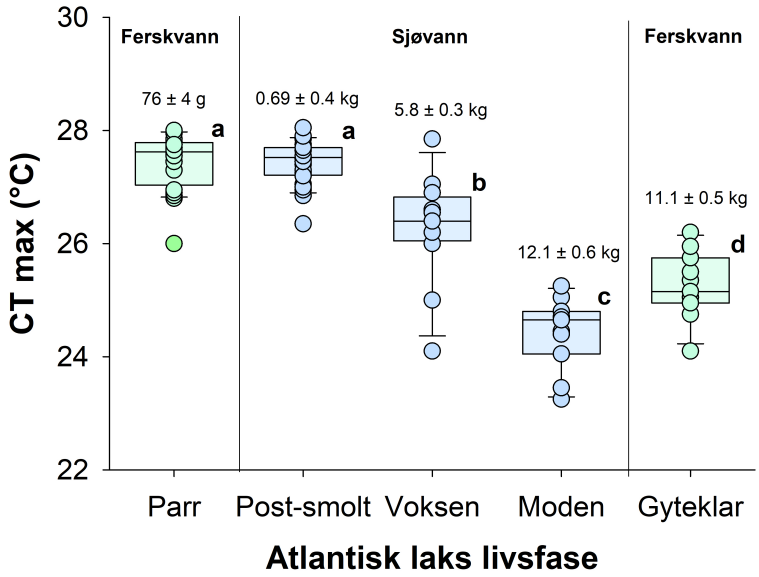


Figur 3.6. Steril triploid laks er mindre klimarobust. Figuren viser kritiske terskler for lave oksygenverdier (kritisk oksygentensjon, P crit) (A) og høy temperatur (kritisk termisk maksimum, CT max) (B) hos normal diploid laks og steril triploid laks. Disse terskelverdiene representerer akutte tilstander som fisken ikke kan overleve lenge. Testene ble utført på stor fisk på omtrent 3 kg i saltvann, og stjernen indikerer statistisk forskjell mellom gruppene (modifisert fra Hvas et al., 2026).

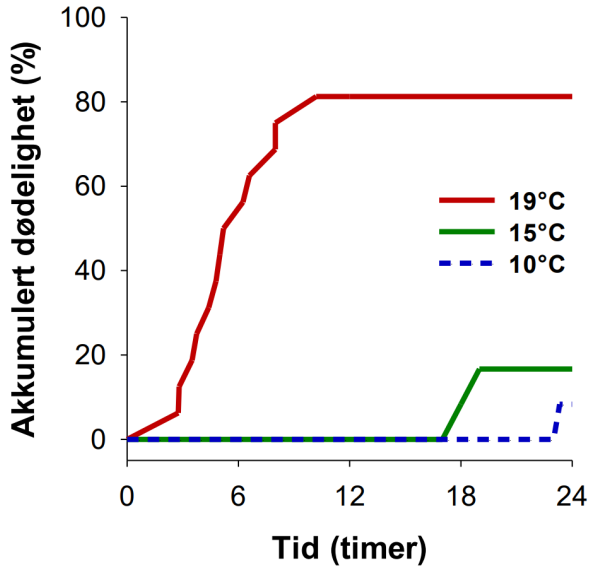
3.1.6 Stor laks mer sårbar for høy temperatur

Temperaturtoleransen hos fisk endrer seg gjennom livet og med kroppsstørrelsen. De tidligste livsstadiene og de store kjønnsmodne livsstadiene er vanligvis mer sårbare for ekstreme temperaturer (Killen et al., 2007; Pörtner & Farrel, 2008). Samtidig har forskningen stort sett satt søkelys på temperatureffekter i de midtre livsstadiene, fordi disse vanligvis er lettere å studere i eksperimenter. Dette gjelder også laks, hvor kunnskapen vår primært kommer fra smolt- og post-smolt-livsstadiene fra rundt 30 g til 1 kg. Før å øke kunnskap om de livsstadiene som forventes å være mest sårbare har forskere ved Havforskningsinstituttet nylig gjennomført flere studier på stor laks som veier flere kilo. Disse fiskestørrelsene representerer den siste delen av den marine vekstfasen, som er spesielt kritisk for den totale lønnsomheten i lakseoppdrett. Vi ser generelt at akutt temperaturtoleranse er lavere hos stor laks som veier flere kilo sammenlignet med laks som veier mindre enn én kilo (Fig. 3.7).

Stor laks er også mer sårbar for stressrelatert dødelighet enn mindre laks ved høyere temperaturer (Hvas et al., 2025) (Fig. 3.8). Dette betyr at stressende operasjoner der fisken trenges og håndteres, for eksempel ved avlusing, vil være forbundet med økt sannsynlighet for dødelighet hos stor fisk ved høyere temperaturer. Stor laks har også lavere toleranse for hypoksi og redusert kapasitet for maksimalt oksygenopptak ved høyere temperaturer. Årsaken til at laks blir mindre klimarobust når den har vokst seg stor, skyldes muligens begrensninger i evnen til å tilføre nok oksygen over gjellene. Vi mangler imidlertid fortsatt mye kunnskap om velferden til stor oppdrettslaks fra et klimaperspektiv, og hvordan grenseverdier endres gjennom livsstadiene i en produksjonssyklus.



Figur 3.7. Akutte terskelverdier for høy temperatur hos Atlantisk laks på ulike livsstadier. Her vist som kritiske termisk maksimum (CT max). Ved måling av CT max varmes vannet opp med en jevn hastighet (her med 3 °C per time) inntil fisken mister likevekt. Alle gruppene var blitt akklimatisert til 10 °C i minimum 2 uker før testen. Snittvekten til hver gruppe er vist på figuren. Stor laks på flere kg har generelt dårligere toleranse for høy temperatur (Hvas et al. in prep.).



Figur 3.8. Stressrelatert dødelighet hos stor laks ved forskjellige temperaturer. Figuren viser dødelighet hos Atlantisk laks på ~ 5 kg holdt ved forskjellige temperaturer etter å ha blitt utsatt for akutt håndteringsstress og innesperringsstress. Stor laks er mer oksygenbegrenset under stress ved høye temperaturer. Dette øker sannsynligheten for dødelighet i tiden etter akutt stress, for eksempel etter avlusningsoperasjoner (Modifisert fra Hvas et al. (2025)).

3.1.7 Seleksjon for klimarobust laks

Oppdrettslaks har blitt selektivt avlet for ønskede akvakulturegenskaper i flere generasjoner (Gjedrem et al., 2012). Fra et klimaendringsperspektiv er det derfor relevant å vurdere om forbedret termisk toleranse kan oppnås gjennom selektiv avl. Nyere studier har vist at kritisk og inkrementell termisk toleranse faktisk kan variere betydelig mellom laksefamilier (Anttila et al., 2013; Ignatz et al., 2023) og at disse egenskapene viser en viss arvelighet (Benfey et al., 2024; Gonen et al., 2024). For å tilpasse lakseoppdrett til klimaendringer kan en strategi derfor være å inkludere termisk toleranse i avlsprogrammer. Det er likevel viktig å huske at laks fortsatt er en kaldtvannsart og at det er begrenset hvilken effekt selektiv avl vil kunne ha på temperaturtoleransen.

3.1.8 Viser oppdrett i Tasmania fremtiden?

For å få et glimt av fremtiden kan vi se på oppdrettslaks i andre deler av verden hvor hetebølger allerede kan være alvorlige. Her kan Tasmania betraktes som frontlinjen for klimaendringer, hvor analyser av havoverflatetemperaturer har konkludert med at noen nåværende oppdrettsanlegg ikke vil være egnet for lakseoppdrett i fremtiden (Meng et al., 2022). Samtidig er det allerede rapportert om dårlige oksygenforhold og ugunstige temperaturer i merder under tasmanske hetebølger, noe som har ført til at fisk mister appetitten og opplever negativ vekst i mange uker (Dempster et al., 2016; Stehfest et al., 2017; Wade et al., 2019). Fiskedødelighet i disse studiene ble ikke rapportert.

3.1.9 Oppsummering av oppdrettslaksens klimabiologi

De primære utfordringer for oppdrettslaksens velferd i et varmere klima er oppsummert i Tab. 3.1. For tiden er de klimatiske forholdene i Norge fortsatt gode for oppdrett av Atlantisk laks (se Fig. 2.2 og Fig. 2.9), men beredskap for fremtiden er viktig. Tilpasningsstrategier kan inkludere et enda strengere søkelys på fiskehelse, ettersom stresset, parasittinfisert eller syk fisk vil være mer sårbar for ugunstige oppdrettsmiljøer. Her vil kontinuerlig forbedring og utvikling av effektive vaksiner eksempelvis fortsatt være viktig, da bakterier og andre patogener også forventes å endre seg i fremtiden (kap. 4.2). I tillegg er nøye overvåking av oppdrettsmiljøet

med hensyn til temperatur, oksygen, vannstrømmer og fiskebiomasse i de varmeste periodene av året spesielt viktig. Sesongvariasjoner i vanntemperaturer endrer seg relativt sakte, og ved bruk av gode værmeldingsmodeller bør det være mulig å gripe inn før forholdene blir så dårlige at de forårsaker negative effekter på dyrevelferden. Dersom lange perioder med vanntemperaturer over 20 °C langt ned gjennom vannsøylen blir normen ved norske oppdrettsanlegg i fremtiden, kan det bli nødvendig å planlegge produksjonen slik at fisk ikke settes ut på sensommeren og tidlig høst, når vanntemperaturene er på sitt høyeste. Resten av året forventes det fortsatt å være gode vanntemperaturer for lakseoppdrett.

Tabell 3.1. De mest sentrale problemstillinger for oppdrettslaksens velferd fra et klimaperspektiv.

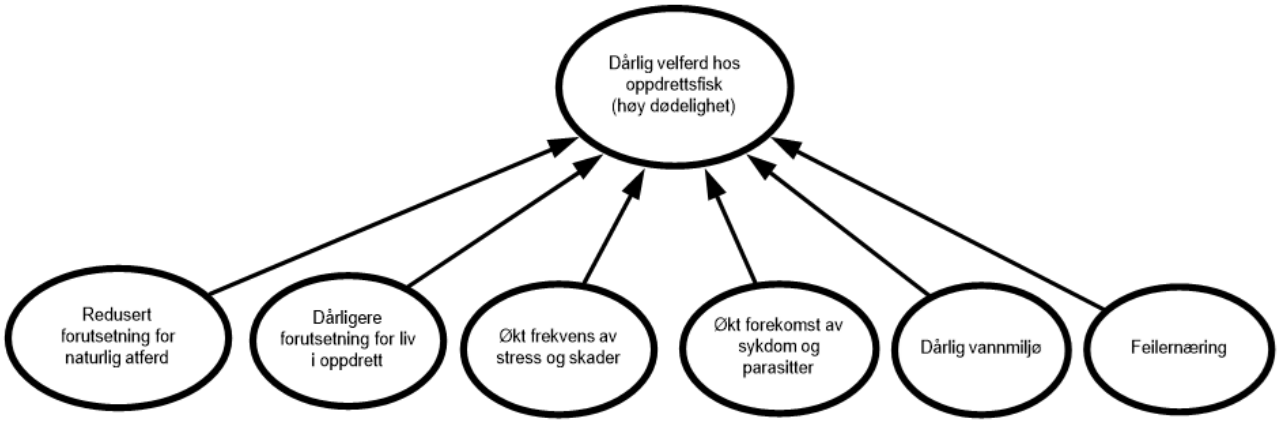
Velferdstema	**Problemstilling**
Appetitt, vekst og ernæring	Frivillig faste, negativ vekst, endrede ernæringsbehov
Tidlig uønsket kjønnsmodning	Konsekvens av høy temperatur.
Dårlige oksygen forhold	Sannsynlighet for hypoksi øker med temperaturen.
Sykdom	Patofysiologiske effekter kan forsterkes på høy temperatur.
Oksidativt stress i organer og grå stær (katarakt)	Risikoen øker med temperaturen.
Genetikk	Potensiell seleksjon for mer klimarobust laks.
Steril triploid laks	Triploid laks er mindre klimarobust.
Robusthet overfor stress og annen håndtering	Stor laks tåler stress dårligere på høy temperatur.
Dødelighet	Langvarige hetebølger kan medføre høy dødelighet.

3.2 Vurdering av klimaendringer på velferd

I norske oppdrettsanlegg svømmer det i dag flere hundre millioner oppdrettsfisk rundt, langt flere i antall enn for landbaserte produksjonsdyr. Norsk oppdrett domineres av Atlantisk laks, hvor 16–18 % av matfisken (fisk i sjø) registreres som tapt hvert år (Grefsrud et al., 2026). Vi har et spesielt ansvar for dyrene vi holder i fangenskap, og på samme måte som for våre produksjonsdyr i landbruket, er oppdrettsfisk beskyttet av dyrevelferdsloven.

Målet i det følgende er å gi en oversikt over potensiell dårligere velferd til oppdrettslaksen sett utfra et klimaperspektiv. Dette gjøres under antagelsen om at det fremtidige klimaet forventes å bli varmere og preget av hyppigere og mer ekstreme værfenomener, inkludert mer kraftige stormer, hypoksihendelser og hetebølger (se kap. 2). Vi forsøker da å vurdere hvordan slike fremtidige oppdrettsmiljøer muligens vil påvirke de velferdsbehovene som er lovpålagt gjennom Dyrevelferdsloven. Disse vurderinger er basert på publisert kunnskap om laksens grunnleggende biologi, og spesielt med tanke på temperatureffekter på fysiologiske funksjoner og fiskehelse (se avsnitt 3.1). Vi gir ikke separate risikovurderinger for hvert produksjonsområde, men presenterer i stedet en samlet oversikt over de forventede viktigste klimarelaterte utfordringene for norsk lakseoppdrett i årene som kommer.

Oppdrettsfiskens velferd avhenger av hvordan de grunnleggende behovene for å vokse og overleve dekkes. Basert på kravene i Dyrevelferdsloven har vi delt disse grunnleggende behovene inn i seks kategorier (Fig. 3.9). Alle de skisserte behovene må være oppfylt for at fisken skal vurderes å ha god velferd: (1) mulighet til å utøve naturlig atferd, (2) ha de nødvendige fysiologiske og mentale forutsetningene for å tåle dagens oppdrettsmetoder, (3) ikke utsettes for skader, stress og andre farer, (4) beskyttes mot sykdom, (5) tilbys et oppdrettsmiljø som muliggjør god velferd, og (6) motta fôr som dekker ernæringsbehovene.



Figur 3.9. Redusert velferd hos oppdrettslaks som følge av komprimering av de seks grunnleggende behov.

3.2.1 Redusert forutsetning for naturlig atferd

Fisk har en rekke atferdsbehov som må oppfylles for å ha god velferd i akvakultur. Disse inkluderer behovet for hvile, utforskning, stell, regulering av kroppstemperatur, sosial kontakt og atferdskontroll. Med atferdskontroll mener vi at fisk har kontroll over bevegelsene sine og kan unnslippe farer og dårlige miljøforhold og svømme mot ressurser som mat.

Klimarelaterte endringer vil først og fremst påvirke oppdrettslaks i den marine fasen av produksjonen. I store sjømerder har fisken god bevegelsesfrihet og kan søke sitt foretrukne miljø ned gjennom vannsøylen inne i merden. Hvis det er store dybdegradienter i for eksempel temperatur og saltholdighet, kan det bli konkurranse om de foretrukne områdene, noe som resulterer i lokalt høye fisketettheter og økt risiko for lave oksygennivåer i disse områdene. Deler av gruppen kan bli fortrengt og må da nøye seg med mindre foretrukne områder i merden.

Siden merdene gir relativt stor atferdsfrihet og variasjon, vurderes det at oppdrettslaksen har god forutsetning for naturlig atferd. Dette kan imidlertid endre seg i perioder med hetebølger, perioder med dårlige oksygenforhold og ekstremvær i fremtidens klima, hvor oppdrettsmiljøet kan bli mindre gunstig og fiskens biologiske grenser overskrides. Fordi oppdrettsfisken ikke har mulighet til å svømme bort til bedre forhold i et slikt scenario, mister den muligheten til å utøve naturlig atferd, fordi den er fanget i et miljø som begrenser dens naturlige atferd. Konsekvensene for fiskevelferden vil da avhenge av hvor ekstreme forholdende blir og hvor lenge de varer. Effektene på fisken vil kunne variere fra redusert appetitt til frivillig faste, kronisk stress og i verste fall massedødelighet under spesielt ekstreme forhold.

Andre former for ekstremvær i fremtidens klima kan også bety sterkere strømmer og større bølger på eksponerte oppdrettslokaliteter. Her må laksens svømmekapasitet, evne til å håndtere turbulente forhold og andre relevante terskelverdier tas i betraktning. Generelt har større laks større kapasitet til å motstå sterk strøm enn mindre laks, men også andre faktorer som temperatur har betydelse.

Vi har i dag god kunnskap om laksens naturlige atferd og artens tilpasning til ulike miljøforhold. Hvordan oppdrettsmiljøet mer spesifikt vil bli påvirket av fremtidige hetebølger og annet ekstremvær er mer usikkert, og vil også i stor grad avhenge av geografiske plasseringer fra sør til nord og fra skjermede fjorder til åpent hav. Det er også uvisst hvorvidt ny oppdrettsteknologi som utvikles for å møte klimautfordringene vil gi samme mulighet for naturlig atferd som tradisjonelle merder.

3.2.2 Dårligere forutsetning for et liv i oppdrett

Krav til liv i oppdrett betyr at fisk som skal leve i en oppdrettsenhet må ha de fysiologiske og morfologiske forutsetningene for å tåle oppdrettsmiljøet og håndteringsoperasjonene de opplever i løpet av en typisk produksjonssyklus. Bare de individene som har gode forutsetninger til å håndtere dette er egnet for et liv i oppdrett. For eksempel må laks som plasseres i marine merder ha gjennomgått smoltifisering slik at de faktisk kan tolerere og leve i saltvann. Om et individ har forutsetningene for et liv i fiskeoppdrett avgjøres av både artsspesifikke egenskaper, individuelle egenskaper, og om de har fått passende miljøforhold og ernæring som har gitt normal utvikling og god helse. Oppdrettsfisk holdes i mye høyere tettheter enn i naturen og bør derfor vaksineres mot de sykdommene det finnes vaksiner mot, og fisk bør også ha et godt immunforsvar som kan tåle et høyere smittepress fra parasitter, virus og bakterier enn fisk normalt ville blitt utsatt for i naturen. Forutsetningene for et liv i oppdrett kan endre seg i fremtidens mer ekstreme klima, fordi de nødvendige forutsetningene ikke lenger er de samme som før. Å være “klimarobust” vil være en ny forutsetning, som blant annet innebærer tilpasset toleranse for temperatur- og hypoksiekstremer som kan oppstå i oppdrettsmiljøet. Flere studier har blitt utført på variasjon i termisk toleranse blant ulike laksefamilier. Det gjenstår imidlertid å se hvor mye laksens toleranse for blant annet høye temperaturer og hypoksi kan forbedres gjennom avl. Det kan antas at disse egenskapene kan forbedres til en viss grad i løpet av de neste generasjonene, men også at det vil være en klar øvre grense fordi laks opprinnelig er en kaldtvannsart. Hvorvidt oppdrettslaks er rustet til å håndtere fremtidige forhold eller eventuelt kan tilpasse seg gjennom avl, avhenger av hvilke klimascenarier som blir virkelighet.

3.2.3 Økt frekvens av stress og skader

Flere faktorer kan påvirke mengden og alvorlighetsgraden av stress og skader oppdrettsfisk utsettes for. Disse inkluderer blant annet sortering og annen håndtering (f.eks. vaksinasjon), avlusinger og transport. Særlig frekvensen av avlusinger kan forventes å øke med økt temperatur og raskere generasjonstid for lakselus (se kap. 4.3). Fisk som opplever kronisk stress har redusert immunfunksjon, helse og vekst. Skader og sår kan også bli infisert av bakterier og forårsake langvarig lidelse.

I et varmere og mindre gunstig oppdrettsmiljø forventer vi at laks generelt vil være mindre robust mot stress og tilhørende skader. Dette gjelder spesielt for stor laks over 3 kg i den siste delen av den marine produksjonssyklusen. Den nyeste forskningen viser at etter hvert som laksen vokser seg større, har den lavere toleranse for høy temperatur og hypoksi, og er også mindre effektive til å restituere etter akutt stress. Dette øker sannsynligheten for stressrelatert dødelighet i timene etter lusebehandlinger og andre håndteringsoperasjoner, spesielt hvis vanntemperaturen også er høy.

Et varmere og mer oksygenfattig oppdrettsmiljø kan også føre til kronisk stress hos oppdrettslaks. En konsekvens av dette vil blant annet være redusert appetitt og vekst, og et svekket immunforsvar. Et svekket immunforsvar i fisk med kronisk stress vil redusere motstandsdyktigheten overfor nye sår og skader, og også øke sannsynligheten for alvorlige infeksjoner. Generelt vil robustheten mot eksterne stressfaktorer bli negativt påvirket dersom oppdrettsmiljøet blir mindre gunstig på grunn av klimapåvirkninger.

Vi mangler for tiden mye kunnskap om stressrobusthet og terskelverdier i samspill med temperatur på tvers av fiskestørrelser, men spesielt hos stor fisk fra den avsluttende del av den marine produksjonssyklus, ettersom kontrollerte forsøk på disse temaene primært har blitt utført på relativt små fiskestørrelser. Det gjenstår også å avklare hvordan skader og sår påvirker oppdrettslaks under suboptimale miljøforhold med høy temperatur og lave oksygenverdier.

3.2.4 Økt forekomst av sykdom

Sykdomsfremkallende organismer (patogener) som virus, bakterier og parasitter i eller på fisk, vil ofte påvirke

fiskens velferd negativt over tid. Oppdrettsfisk kan bli smittet og bli bærer av virus, bakterier og parasitter uten å utvikle sykdom og fortsatt fungere normalt. Hvis de ulike typene smittsomme organismer får utvikle seg, kan det føre til sykdom som vil forårsake redusert appetitt, drastiske endringer i atferd og kliniske tegn på sykdom. Det er forskjeller i hvordan ulike sykdommer manifesterer seg, hvilke livsstadier de påvirker og hvilke faktorer som utløser et sykdomsutbrudd. For noen sykdommer, som virussykdommen kardiomyopatisyndrom (CMS) som påvirker hjertemuskelen, viser oppdrettsfisk ofte få endringer i atferd eller ytre tegn på sykdom før de dør plutselig, for eksempel i forbindelse med stress under håndtering. Bakteriesykdommer som forårsaker abscesser (byller) eller åpne sår må antas å være svært skadelige for velferden. Ikke-infeksiøse sykdommer, omtalt som produksjonslidelser, utgjør også betydelige velferds- og sykdomsproblemer i akvakultur. Eksempler på slike lidelser, som det for øyeblikket ikke finnes noe spesifikt patogen assosiert med, er nefrokalsinose og hemorragisk smoltsyndrom (HSS) hos laks. Vanlige produksjonslidelser omfatter også beindeformiteter og katarakter i øyet til laksen.

Utfordringer med sykdom og parasitter vil fortsette i fremtidens klima. En generell bekymring er oksygenbegrensninger hos syk fisk, noe som vil ha en økt negativ synergistisk effekt ved høyere temperaturer, ettersom det er mindre oksygen i vannet samtidig som fiskens stoffskifte og dermed oksygenbehov øker. Fisk med redusert helse forventes da å bli enda mer komprimert ved høyere temperaturer, noe som betyr at de vil ha dårligere appetitt, mindre robusthet mot stress og større sannsynlighet for økt dødelighet. Så på generelt grunnlag kan vi si at fisk vil være mer sårbar for sykdom forårsaket av parasitter, virus og bakterier i oppdrettsmiljøer.

Vi har imidlertid betydelige kunnskapshull om hvordan de enkelte helseutfordringer mer spesifikt samhandler med miljøeffekter (f.eks. temperatur og hypoksi). Det bør også forventes at mange sykdomstilstander forverres av høyere temperaturer, både gjennom effekter på fiskens fysiologi og immunrespons, men også på effektene av individuelle patogener og deres smittespredning (se kap. 4.2). Hetebølgen i Nord-Norge i 2024 sammenfaller for eksempel ikke bare med økt forekomst av lakselus, men også med at det dukket opp bakterielle sykdommer en ikke tidligere har påvist i dette området, som pasteurellose og piscirickettsiose. Piscirickettsiose-bakterien (*Piscirickettsia salmonis*) er kjent for å ikke like lave temperaturer. En bakterie som imidlertid liker lave temperaturer, er *Moritella viscosa* som forårsaker vintersår. Dette er et stort velferdsproblem i næringen som potensielt kan bli bedre i et varmere klima. Et problem som kan forventes å bli verre er imidlertid infeksjon av gjelleamøber og nedsatt gjellehelse. Et annet viktig eksempel er lakselus, som har en raskere generasjonstid ved høyere temperaturer, og den individuelle lusen vil også gjøre mer skade på fisken ved høyere temperaturer fordi lusen (som også er vekselvarm) får akselerert stoffskiftet sitt og dermed får en økt appetitt.

For kontinuerlig klimatilpasning vil det være viktig å fortsette med utvikling av gode vaksiner til oppdrettsfisken, også for å minske smittepress til villfisk. Bakterier er særlig kjent for hurtig å kunne endre egenskaper (virulensfaktor). I dag er der lav bruk av antibiotika til behandling av bakterielle infeksjoner, hvilket er bra, men hvis dette skal fortsette må vi fremdeles overvåke og ha nøye kontroll på aktuelle patogener og virulensenderinger, og holde næringen oppdatert med gode vaksinetilbud.

3.2.5 Dårlig vannmiljø

I en oppdrettsenhet kan ikke fisk alltid unnslippe ugunstige forhold og kan derfor med jevne mellomrom bli utsatt for skadelige vannmiljø. Vi bruker her vannmiljø som et bredt begrep for ulike fysiske, kjemiske og biologiske karakteristikker på vannet fisken lever i, inkludert temperatur, saltinnhold, oksygennivå, vannføring, konsentrasjoner av avfallsprodukter fra oppdrettsfisk, samt skadelige alger, maneter og partikler og kjemikalier i vannet. Faktorene som påvirker vannmiljøet kan variere mellom produksjonssystemer, steder og produksjonsområder.

Vannmiljøet påvirkes også av fiskens oksygenforbruk og utslipp av avfall og ekskrementer. Det slippes kontinuerlig ut avfallsprodukter fra fisken, som ammoniakk og CO_2, men i sjømerder blir ikke konsentrasjonene høye nok til å være et problem. Perioder med lave oksygennivåer som redusere fiskens appetitt er allerede per i dag en utfordring i merder med høy biomasse i perioder med lav vanngjennomstrømning og høy temperatur.

I fremtidens klima vil endringer i vannmiljøet være den mest sentrale faktoren for oppdrettslaksens velferd. Dette gjelder spesielt i forhold til endringer i temperatur og oksygenforhold i oppdrettsmiljøet, ettersom disse faktorene direkte påvirker og samhandler med alle de andre faktorene, som beskrevet i de foregående avsnittene. Vi har relativt god kunnskap om laksens samlede behov og toleransegrenser for både temperatur- og oksygenverdier. Det store spørsmålet er derfor hvilke klimascenarier som vil være relevante i fremtiden. Dersom vannmiljøet blir for ekstremt med langvarige, kraftige hetebølger, vil det øke risikoen for dyrevelferdsproblemer, slik man allerede har erfart i tasmansk lakseoppdrett.

Noe som gjør bildet enda mer komplisert, er de mange mulige indirekte konsekvensene et varmere klima kan få for vannmiljøet i laksemerder. Økt begroing (se kap. 5.4) kan for eksempel føre til redusert vanngjennomstrømming og derfor dårligere oksygenforhold. Behovet for hyppigere spyling av nøtene øker, som igjen kan føre til at det blir frigjort nesleceller og andre partikler i vannet som kan skade gjellene til laksen. Andre eksempler er at hyppigheten av skadelige algeoppblomstringer og maneter kan endre seg. De siste årene har vi sett flere tilfeller av at alger eller maneter har forårsaket omfattende fiskedødelighet i næringen. Det er behov for mer kunnskap om hvorvidt det er en sammenheng mellom klimaendringene og alge- og manetoppblomstringer.

I de ulike klimascenariene vil også oppdrettslokasjoner langs norskekysten bli påvirket ulikt. I den sørlige delen av landet, hvor temperaturene allerede periodevis kan nå ugunstige verdier på sensommeren, vil oppdrettsfisken være mer sårbare for ytterligere temperaturøkninger. Motsatt vil et varmere vannmiljø lenger nord kunne føre til at veksten kan bli gunstigere store deler av året. Med de predikerte klimaendringene vil det derfor være viktig fortsatt å overvåke de mest sentrale vannkvalitetsparameterne i oppdrettsmiljøet.

3.2.6 Feilernæring

For at oppdrettsfisk skal oppnå god velferd, må den ha kontinuerlig tilgang til attraktivt og næringsrikt fôr som dekker deres fysiologiske behov gjennom hele produksjonen. Praktiske aspekter ved fôring er avgjørende, som riktig pelletstørrelse tilpasset fiskens livsstadium, tilstrekkelig fôrmengde samt hensiktsmessig fordeling av fôret i tid og rom, slik at alle individer i oppdrettsanlegget får tilgang til fôr. Feil pelletstørrelse eller ugunstig fôring, sammen med manglende kontroll over biomasse og fôringsmetoder, kan føre til ulik fôrtilgang, økt størrelsesvariasjon, uheldig hierarkisk atferd og dårlig vekst hos de svakere individene.

Fôrets næringsstoffsammensetning må også samsvare med fiskens behov. Tidligere ble fiskefôr hovedsakelig produsert av marine råvarer, men over tid har dette endret seg. Dagens fôr består i større grad av raffinerte planteingredienser, samtidig som nye alternativer som insektmel gir ytterligere variasjon. Endringer i fôrsammensetning har historisk vært forbundet med velferdsutfordringer. Fjerningen av blodmel, som følge av tiltak mot kugalskap, ble senere knyttet til et utbrudd av katarakt hos laks, som følge av redusert tilførsel av aminosyren histidin i dietten. Videre er tarmlidelser også blitt knyttet til antinæringsstoffer fra mindre raffinerte planteråvarer.

Selv om dagens laksefôr, dominert av raffinerte plantebaserte råvarer, generelt antas å dekke oppdrettsfisken sine ernæringsbehov (forutsatt gunstige miljøbetingelser), og vurderes som tilstrekkelig på tvers av produksjonsområder, er denne antakelsen begrenset. Dette skyldes få uavhengige data om faktiske næringsstoffnivåer i kommersielt fôr, samt kunnskapshull om hvordan samspillet mellom endrede miljøforhold, fôrsammensetning, og ikke minst bruk av funksjonelle fôrtilsetningsstoffer påvirker oppdrettslaksens velferd.

Forbedret overvåking og målrettet forskning på næringsstoffbehov, næringsstoffinteraksjoner og fôrsammensetning er derfor nødvendig for å sikre en bærekraftig og velferdsvennlig akvakultur.

I fremtidens klima vil varmere oppdrettsmiljøer endre fiskens ernæringsbehov. Avhengig av geografisk plassering kan vekstmønsteret påvirkes både positivt (nord) og negativt (sør). Lengre perioder med høye ugunstige vanntemperaturer reduserer fiskens appetitt og vekst, og kan akselerere uønsket kjønnsmodning og samtidig øke sannsynligheten for ernæringsmangler og produksjonslidelser. Siden fiskens metabolisme også øker ved høyere temperaturer, vil en større andel av energien fra fôret gå til å dekke behovet for vedlikehold fremfor vekst, noe som gir dårligere fôrutnyttelse. Vi har for tiden god forskning og praktisk kunnskap om effekten av temperatur og oksygentilgjengelighet på appetitt og vekst hos oppdrettslaks. Basert på dagens klimascenarier kan fôringsstrategier dermed tilpasses de gitte miljøforholdene på oppdrettsstedene.

På den andre siden er vår kunnskap om ernæringsbehovene i et varmere klima mer mangelfull, spesielt for stor fisk. En høyere metabolisme og endrede vekstkurver ved høyere temperaturer vil påvirke fiskens næringsstoffbehov for optimal helse og dyrevelferd. Økt metabolsk aktivitet øker også mengden oksidativt stress i organer og sannsynligheten for kataraktdannelse, noe som kan kreve mer antioksidanter og spesifikke aminosyrer som histidin i fôret. Slike ernæringsbehov kan være sterkt temperaturavhengige, hvor eksempelvis tilskudd av sink under den tidlige sjøvannsfasen har vist seg å kunne redusere forekomst og alvorlighetsgrad av katarakt, men med varierende effekt avhengig av temperatur. Dette illustrerer hvordan ernæringsstrategier må tilpasses samspillet med miljøforholdene.

Et varmere klima innebærer dessuten ikke bare økte gjennomsnittstemperaturer, men også hyppigere og mer ekstreme temperaturhendelser (hetebølger). Et viktig kunnskapshull er hvordan hetebølger påvirker fiskens ernæringsstatus, særlig i forhold til mobilisering og nedbrytning av antioksidantreserver i organer, samt hvordan utgangsstatus ved inngangen til en slik varmeperiode påvirker fiskens robusthet. Videre er det begrenset kunnskap om hvordan varighet og intensitet av slike ekstreme temperaturtopper samlet sett påvirker forbruket av essensielle næringsstoffer, inkludert vitaminer, mineraler og antioksidanter. Dette gjelder spesielt i perioder når fisken reduserer eller helt mister appetitten sin. Så selv om fôringsstrategier til en viss grad kan tilpasses temperatur og oksygenforhold, representerer manglende kunnskap knyttet til endrede ernæringsbehov en viktig risikokilde for fiskehelse og velferd i et varmere klima.

3.3 Konklusjon

I dette kapitel har vi først beskrevet oppdrettslaksens basale klimabiologi og deretter beskrevet de viktigste faktorene som kan føre til dårligere dyrevelferd i fremtidens lakseoppdrett. Det er usikkerhet knyttet til å forutsi hva som kommer til å skje i fremtiden, og vi har derfor valgt å diskutere på et generelt grunnlag fremfor å konkretisere spesifikke sannsynligheter for økt risiko i de seks ulike velferdskategoriene. Dette skyldes delvis manglende kunnskap om hvordan fremtidens klima vil bli, og delvis på grunn av manglende kunnskap om kompleksiteten til de mange ulike faktorer som samhandler med hverandre i sine påvirkninger på dyrevelferd. Oppgaven kompliseres ytterligere av det faktum at Norge geografisk er et langstrakt land med betydelige klimaforskjeller mellom nord og sør. Dette vil bety at lokale klimaeffekter kan variere betydelig mellom ulike oppdrettslokaliteter.

Noen av kunnskapshullene kan fylles gjennom målrettet forskning i de kommende årene, mens andre vil kreve praktisk erfaring med oppdrett under mer ekstreme miljøforhold. For eksempel er det vanskelig å forutsi hvordan spredningen av smitte og sykdomseffekter av spesifikke patogener og parasitter vil være under endrede klimaforhold (se kap. 4.2), og hvordan deres effekter på helse og velferd hos oppdrettsfisk vil samhandle med andre eksisterende biologiske og miljømessige utfordringer. En ting er sikkert, for å kunne

gjennomføre den nødvendige klimatilpasning av norsk lakseoppdrett i årene som kommer, må vi fortsette med å forbedre våre kunnskapsgrunnlag i samspill med utviklingen av ny teknologi og målrettede produksjonsstrategier.

4 - Effekter på vill laksefisk i et klimaperspektiv

4.1 Introduksjon

Ville bestander av laksefisk påvirkes av en rekke menneskeskapte endringer gjennom miljø- og klimaendringer, inkludert påvirkning fra oppdrett. Graden av påvirkning avhenger i stor grad av den enkelte populasjonens tilstand og robusthet. Bestander med svekket bestandsstatus, redusert genetisk variasjon eller tidligere belastninger vil ha lavere motstandsevne og være mer sårbare for ytterligere påvirkning. Effektene av nye stressfaktorer er derfor ofte ikke lineære, men kan føre til terskeleffekter der bestander raskt svekkes ytterligere eller kollapser. Effekten av klimaendringer, både isolert og i samspill med miljøpåvirkninger fra akvakultur, forventes ikke å være lik for laks, sjøørret og sjørøye. Dette skyldes forskjeller i temperaturtoleranse, habitatbruk og livshistorie.

Den økende invasjonen av stillehavslaksen pukkellaks (*Oncorhynchus gorbuscha)* omtales ikke i detalj her, men antas å endre konkurranseforhold, ressursbruk og økologiske interaksjoner i elv og kystøkosystemer (Dunmall et al., 2025) og kan bidra til å forsterke de negative effektene av menneskeskapte påvirkninger på de tre laksefiskartene.

For ferskvannsmiljøet er de viktigste klimarelaterte endringene knyttet til høyere vanntemperaturer, endrede nedbørsmønstre og økt hyppighet av ekstremvær. Slike endringer kan påvirke elvenes fysiske og biologiske forhold og dermed produktiviteten til ville laksefiskbestander. Tørre perioder kan redusere gytesuksess og yngeloverlevelse, blant annet gjennom mindre tilgjengelige gyteområder og redusert habitat for tidlige livsstadier (Sundt-Hansen et al., 2018). Vanntemperaturen styrer utviklingshastighet, vekst og vandringsatferd, og økte temperaturer kan føre til endret klekketidspunkt, raskere vekst og tidligere smoltutvandring, noe som isolert sett kan øke smoltproduksjonen (Hedger et al., 2013) men også øke sannsynligheten for misforhold mellom utvandringstidspunkt og tilgjengelighet av byttedyr (Wilson et al., 2023). Samtidig har alle arter en øvre fysiologisk temperaturgrense og høyere temperaturer kan også øke sykdomsrisikoen (Jonsson & Jonsson, 2009).

Fødetilgang påvirker overlevelse for enkeltindivid, motstandsdyktighet og populasjonsstørrelse. Dette gjelder fødetilgang både i ferskvann og sjø, der mengde og sammensetning kan påvirkes av klimaendringer. Endret næringsgrunnlag kan gi lavere vekst eller føre til ernæringsmessige mangler selv om byttedyrmengden ikke nødvendigvis er redusert (Mantua et al., 2025). I Norge vandrer vill laksefisk vanligvis ut i sjøen om våren når vanntemperaturen ligger rundt 8–10 °C. Endringer i temperatur og avrenning kan forskyve tidspunktet for utvandring slik at fisken ikke lenger møter best mulig mattilgang (Taylor, 2008). Dette er et eksempel på manglende samsvar i evolusjonært tilpassede tidsvinduer som forskyves av klimaendringer (Beck et al., 2025; Wilson et al., 2023).

Laks

Elvens vannføring har stor betydning både for smoltutvandring og for oppvandring av gyteklar laks (Harvey et al., 2022; Harvey et al., 2020). Varmere vann i elv kan føre til tidligere smoltutvandring som igjen kan skape et misforhold mellom tidspunktet for utvandring og optimale marine forhold for overlevelse (Jonsson & Jonsson, 2009; Kennedy & Crozier, 2010). Mer ekstreme vannføringer, som flommer, kan vaske bort gytegroper, forskyve sårbar yngel og endre elvebunnen på måter som reduserer gytesuksess og overlevelse. Endringer i nedbør kan også påvirke avrenning og dermed næringstilførsel, ofte med negative konsekvenser for villaksens overlevelse. Slike effekter vil variere geografisk og må tas i betraktning ved risikovurdering av laks i et endret klima.

I marin fase forventes det endringer i havets s irkulasjon og temperatur som potensielt kan påvirke havets

produktivitet, næringsvevsdynamikk og tilgang til mat for villaksen (Doney et al., 2012; Hoegh-Guldberg & Bruno, 2010). I motsetning til ørret og røye som oppholder seg langs kysten i sjøfasen, har laks sine viktigste vekstområder i åpne havområder som Barentshavet og Norskehavet. Selv om marine hetebølger også her blir mer sannsynlige, er utgangstemperaturen lavere enn i kystnære områder, med sommertemperaturer rundt 10–12 °C. Laks fra sørlige elver passerer imidlertid Nordsjøen, der temperaturen er høyere (15–17 °C). Produktiviteten i Nordsjøen har falt markant de siste tiårene, i tråd med modellerte forventninger (Chust et al., 2014), mens tilsvarende tydelige trender ikke er observert i Norskehavet (Planque et al., 2022). Redusert produktivitet i Nordsjøen kan påvirke villaks negativt, mens konsekvensene for beiteområdene i Norskehavet, Barentshavet og tilstøtende havområder fortsatt er usikre. Imidlertid indikerer forskningslitteraturen at de økende temperaturer har negativ effekt på de ville laksebestandene (Gillson et al., 2022; Thorstad et al., 2021).

Røye

Røye, også kalt arktisk røye, er en art som i dag hovedsakelig forekommer i de tre nordligste fylkene i Norge. Sjørøye er den sjøvandrende formen, som beiter i havet noen uker i året før den vandrer tilbake til ferskvann for overvintring. Røye regnes som en kaldtvannsart og er tilpasset et kaldt klima. Disse tilpasningene gjør sjørøya mer sårbar for et varmere klima enn både sjøørret og laks (Layton et al., 2021; Muhlfeld et al., 2024).

Økende temperaturer i havet vil særlig påvirke sjørøya negativt. Marine hetebølger, som forventes å bli både hyppigere og mer intense, kan skape betydelig fysiologisk stress for arten. Samtidig fører klimaendringer til brunere ferskvann som følge av økt tilførsel av organisk materiale. Dette gir redusert lysinntrenging og kan svekke fødetilgang i ferskvannsfasen (Solomon et al., 2015). En slik nedgang i næringsgrunnlaget kan være uheldig for røya som ofte lever i næringsfattige innsjøer. Både økt temperatur og endring i næringstilgangen som følge av klimaendringene, vil kunne svekke sjørøyas overlevelse og konkurranseevne ytterligere. Dette kommer i tillegg til eventuelle belastninger fra lakselus fra oppdrettsvirksomhet. Studier viser at sjørøye tåler lavere nivåer av lakselus enn både laks og sjøørret før negative effekter oppstår, noe som gjør den ekstra utsatt (Fjelldal et al., 2019; Grenier et al., 2023) .

Samlet sett kan klimaendringene gi de andre laksefiskene et konkurransefortrinn i forhold til røya. Særlig sjøørreten, som deler mye av samme leveområder og byttedyr som sjørøya, kan dra nytte av forhold som blir mindre gunstige for røya. Dette kan på sikt føre til forskyvninger i artssammensetningen i nordlige vassdrag og kystområder.

Sjøørret

Ørret er generelt bedre tilpasset varmere forhold enn røye, og et varmere klima kan derfor gi en vekst av populasjonen. Denne positive effekten kan imidlertid bli motvirket av endringer i modning, utvandringsmønstre og predasjon (Bærum et al., 2021; Jonsson & Jonsson, 2009). De nedbørsmønstrene som forventes å påvirke røye negativt, vil også kunne ramme ørret, særlig gjennom økt tilførsel av organisk materiale, endret vannføring og større variasjon i temperatur. Samtidig er det betydelig usikkerhet knyttet til hvordan økende hyppighet av ekstremvær vil påvirke arten. Perioder med tørke kan føre til at mindre vassdrag tidvis enten tørker ut eller blir for varme, mens kraftige nedbørshendelser kan gi flommer som reduserer overlevelsen hos yngel.

Ørret en svært fleksibel art med en rekke ulike livsstrategier innen samme populasjon, og en stor del av bestanden lever hele livet i ferskvann. Denne ferskvannslevende delen er ikke reproduktivt adskilt fra sjøørreten, noe som kan gi en viss robusthet hvis bare forholdene i sjøen eller i ferskvann forverres. Dersom konkurransen fra laks og røye svekkes som følge av at disse artene håndterer klimaendringene dårligere, kan dette være en fordel for ørret. Sjøørreten står likevel overfor flere utfordringer. Den har lengre oppholdstid i fjordene enn laks og blir dermed eksponert for lakselus over lengre perioder. Et varmere hav øker lusepresset ytterligere, noe som forsterker belastningen. Da et mulig konkurransefortrinn i forhold til laks og røye delvis kan

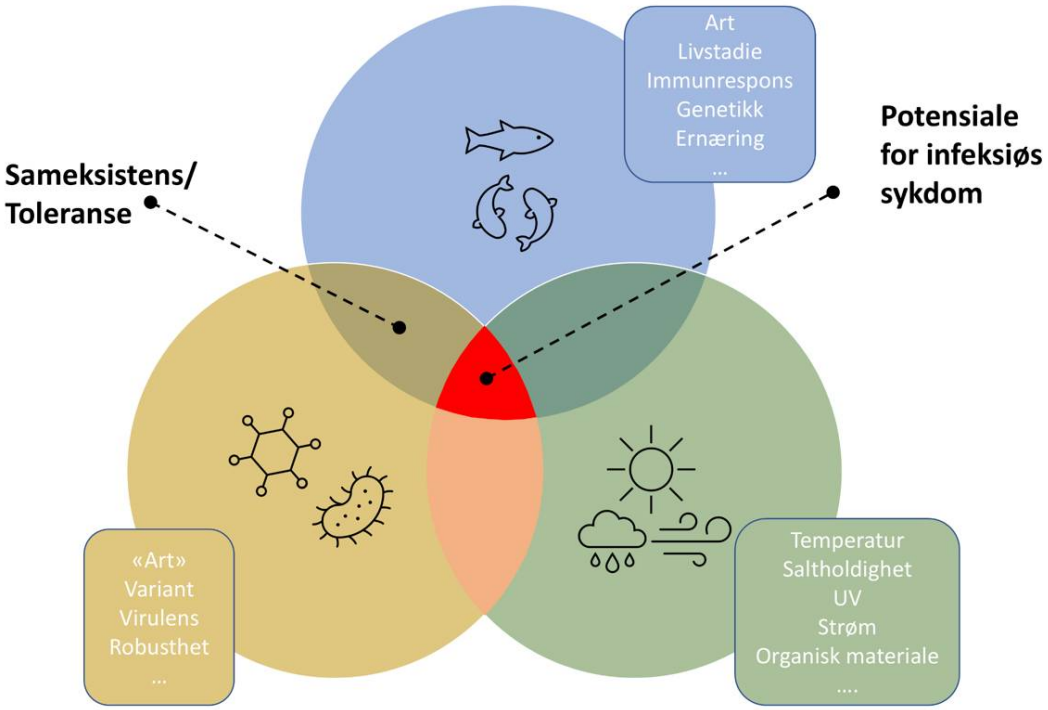
kompensere de uheldige miljøpåvirkningene på grunn av klimaendringer, anses det som usikkert hvordan klimaendringer vil slå ut for ørret.

4.2 Smittespredning fra oppdrettet til vill laksefisk

4.2.1 Introduksjon

Oppdrett i åpne merder gjør at patogener (sykdomsfremkallende organismer) fritt slippes ut fra smittet og syk oppdrettsfisk til miljøet. Smittepresset til villfisk bestemmes av mengde utslipp av patogener, hvordan disse fortynnes i vannmassene og hvor lenge de overlever i miljøet utenfor verten. Et annet avgjørende premiss for graden av smittepress er overlapp i tid og rom mellom tilstrekkelig mengde smittestoff og tilstedeværelse av villfisken.

Effektene av klimaendringene handler om hvordan klimadriverne påvirker samspillet mellom miljø, vert (her: fisk) og patogen (Fig. 4.5). Endringer i klimaet vil kunne endre balansen mellom disse tre, og potensialet for sykdom vil endre seg. Det er derfor sentralt for både oppdrettsnæringen og forvaltningen å forstå hvordan klimaet kan komme til å påvirke smittespredning og sykdom hos både oppdrettsfisk og vill laksefisk.



Figur 4.5. Illustrasjon av det epidemiologiske triangelet. Verter, patogener og miljøet eksisterer i et tett samspill der flere interagerende faktorer er med på å bestemme om det kan oppstå sykdom eller ikke.

Det gjøres her en beskrivelse av klimapåvirkningen i hele årsakskjeden; fra smittekilden (vert), via utslipp, overlevelse, transport og fortynning av patogenet, til eksponering, infeksjon og sykdom hos villfisk. Påvirkningen fra klimaendringene vil ikke bare omfattes av den gradvise forandringen i gjennomsnittssituasjonen (eksempelvis økt gjennomsnittstemperatur), men kanskje minst like mye gjennom den forventede økningen av ekstreme værsituasjoner (eksempelvis marine hetebølger).

For fisk, som er vekselvarme organismer der kroppstemperatur varierer med omgivelsene, virker klimaendringer direkte inn på grunnleggende biologiske prosesser (Alfonso et al., 2021; Ficke et al., 2007; Islam et al., 2022; Whitney et al., 2016). Temperatur er derfor *muligens* den viktigste enkeltfaktoren for hvordan klimaendringene påvirker smitte og sykdom hos fisk (Atroch et al., 2026; Rohr et al., 2011; Scharsack & Franke, 2022; Tomamichel et al., 2025). Både for oppdrettsfisk og villfisk vil høy temperatur og lav oksygenmetning kunne svekke appetitt, vekst, immunrespons og generell robusthet. Raske temperaturskift eller hetebølger vil kunne gi betydelige utslag (Islam et al., 2022; Scharsack & Franke, 2022; Whitney et al., 2016). Dette kan igjen gjøre fisken mer mottakelig for smitte og også føre til at sykdommer får mer alvorlige konsekvenser (Atroch et al., 2026; Rigos et al., 2026; Rocker et al., 2026; Rowley et al., 2024; Tomamichel et al., 2025). Kapittel 3 om velferd i denne rapporten gir en god oversikt over grunnleggende fysiologi hos laks, og beskriver hvordan klimaendringer kan påvirke fisken tålegrenser og robusthet.

Kompleksiteten i samspillet mellom vert, patogen og miljø, klimaendringenes effekt på alle disse, og den store variasjonen mellom ulike patogener, gjør at denne vurderingen er generalisert. I tillegg til direkte effekter vil indirekte effekter av klimaendringene ha betydning for smittesituasjonen. For eksempel vil økt frekvens av fysiske skader i verten også øke mulighetene for infeksjon og sykdom og bidra til endret sykdomsbilde. I oppdrett kan dette for eksempel skje som følge av mer håndtering i forbindelse med lusebehandling, og for villfisk gjennom en økning i luseinduserte skader.

Klimaendringer kan også endre sykdomsbildet ved å favorisere både kjente og nye opportunistiske patogener og legge til rette for at patogener fra varmere strøk etablerer seg (invasive/eksotiske patogener) (Altizer et al., 2013; Rowley et al., 2024; Walther et al., 2009). Effektene av klimaendringer på lengre sikt handler derfor ikke bare om hva som vil skje med de sykdommene som skaper problemer i dagens oppdrett, men også om potensialet for sykdommer forårsaket av nye og endrede agens. Rømt oppdrettslaks kan fungere som en mobil kilde til patogener i fjord- og, spesielt, elvesystemer (Madhun et al., 2015; Madhun et al., 2024; Madhun et al., 2017). Ikke bare antall fisk som unnslipper, men også fiskens infeksjonsstatus, tidspunkt for rømming, romlig fordeling og andre forhold som påvirker fiskens evne til å spre smitte, må hensyntas. Hvordan klimaendringene påvirker graden av rømming er uviss. Det antas at hyppigere ekstremvær kan føre til mer alvorlige enkelthendelser som havari og at rømming som følge av økt håndtering, særlig knyttet til hyppigere avlusninger, kan øke.

Minst like viktig som å forstå hvordan klimaendringer kan påvirke verten (fisken) er hvordan de ulike patogenene vil kunne påvirkes. Når et patogen er utenfor verten (fisken) avhenger spredning og evne til å forbli smittsomt over tid av hvor godt patogenet tåler, eller kan tilpasse seg, det fysisk-kjemiske-biologisk miljøet de opplever utenfor verten. Et patogens overlevelse vil for eksempel påvirkes av temperatur, saltholdighet, pH og UV-stråling (Atroch et al., 2026; Ficke et al., 2007; Okon et al., 2024; Rocker et al., 2026; Rowley et al., 2024). Temperatur er den enkeltfaktoren som er best studert i forhold til påvirkning på overlevelsen til agens utenfor verten, mens andre klimarelaterte faktorer som salinitet, pH, hypoksi er mindre undersøkt (Boehm et al., 2018; Boehm et al., 2019; Guo et al., 2023; Guo et al., 2022; Korajkic et al., 2019; Oidtmann et al., 2018; Pinon & Vialette, 2018; Silverman & Boehm, 2021). Generelt forventes det at økt temperatur gir raskere inaktivering av patogener utenfor verten.

Virus, bakterier og parasitter har svært forskjellig biologi og kompleksitet, med høy variasjon i smitteveier, miljøtilpasning og vert-patogen interaksjoner og er derfor omtalt hver for seg i sine respektive delkapitler.

4.2.2 Virus

Virus er avhengige av levende fisk for å formere seg og smittepresset til villaks er derfor først og fremst knyttet til mengden utslipp av virus fra infisert fisk i oppdrett. Hvor mye virus som slippes ut er avhengig av fiskens

sykdomsutvikling og immunrespons. Temperatur, UV-stråling, saltholdighet og partikler i vannmassene vil påvirke i hvilken grad utskilt virus blir inaktivert (at viruset mister sin evne til å infisere) og brytes ned. Høyere temperaturer, opp til et visst nivå, kan fremme raskere virusreplikasjon (formering av virus i verten) og dermed forsterke smittepotensialet i perioder. Samtidig er virus fortsatt fullstendig avhengige av en kontinuerlig tilgang på mottakelige verter for å kunne replikere og spres. Klimatiske forhold alene er derfor utilstrekkelige for å opprettholde et vedvarende smittepress; dette krever samtidig tilstrekkelig vertstetthet, mottakelighet og gunstige økologiske betingelser. Videre har virus generelt kortere overlevelsestid i miljøet ved høye temperaturer, ettersom varme akselererer nedbrytning og inaktivering av virale strukturer. Dette innebærer at selv om økt temperatur, innenfor et visst temperaturområde, kan intensivere virusproduksjonen *i* verten, vil varme ofte redusere virusets stabilitet *utenfor* verten og dermed begrense muligheten for langvarig smitte i miljøet.

Lavere temperaturer (<15 °C) forbedrer generelt miljøstabiliteten for mange fiskevirus, noe som forlenger smittsomheten og øker overføringspotensialet (Oidtmann et al., 2018). Ulike virus har også forskjellig robusthet i miljøet, avhengig av hvordan de er bygget opp og hvilke egenskaper de har. Dette avgjør hvor lenge viruset kan overleve og utgjøre smittefare. Membrankledde (kappekledde) virus, det vil si virus omgitt av en cellemembran, er mer følsomme for miljøpåvirkning enn nakne virus (uten membran). Slike viruset inaktiveres raskere i miljøet enn mer robuste, ikke-membrankledde virus (Munro & Midtlyng, 2011).

Virussykdommene pankreassykdom (PD) og infeksiøs lakseanemi (ILA), forårsakes henholdsvis av virusene salmonid alphavirus (SAV) og infeksiøs lakseanemi virus (ILAV) som begge er membrankledde og dermed mer følsomme for miljøpåvirkning. Disse virusene overlever kort tid utenfor verten, og overlevelse i frie vannmasser er generelt sett forventet å bli redusert med økende temperatur (Jarungsriapisit et al., 2020; Peñaranda et al., 2026). Smitte til villaks er derfor i stor grad knyttet til nærhet til oppdrettsanlegg, og spredningsområdet vil reduseres om temperaturen øker.

For infeksiøs lakseanemi virus (ILAV) skilles det mellom sykdomsfremkallende/virulente (HPRΔ) og ikke-virulente (HPR0) varianter. Den ikke-virulente varianten sirkulerer bredt i oppdrettsnæringen og kan utvikle seg til den virulente varianten som forårsaker sykdommen ILA. Økende temperatur og høyere replikasjon av HPR0 kan derfor øke sannsynligheten for utvikling av virulente varianter og dermed risikoen for ILA-utbrudd. Smittespredning til villfisk kan skje når infisert oppdrettslaks slipper ut virus i nærheten av områder hvor vill laksefisk lever eller passerer. Dette betyr at både sykdomsutvikling i oppdrett og klimaendringer som forsterker virusreplikasjon, kan øke sannsynligheten for smitte til villfisk. Bedre kunnskap om mekanismene som styrer overgangen fra HPR0 til HPRΔ er derfor viktig for å kunne iverksette effektive tiltak mot ILA under endrede klimatiske forhold, både for oppdretts- og villaks.

Sykdommene hjerte og muskelbetennelse (HSMB) og kardiomyopatisyndrom (CMS) forårsakes av mer stabile nakne virus, som henholdsvis piscint orthoreovirus (PRV) og piscint myokarditttvirus (PMCV). Disse virusene kan gi langvarige infeksjoner og et mer vedvarende smittepress over tid. Disse er utbredt i oppdrett og er også påvist i villfisk, og begge sykdommene har økt i forekomst i oppdrett det siste året (Moldal et al., 2026). Infeksiøs pankreasnekrosevirus (IPNV), som forårsaker infeksiøs pankreasnekrose (IPN), er et annet eksempel på et mer stabilt, ikke-membrankledd virus (Munro & Midtlyng, 2011). Selv om ikke-membrankledde virus som disse generelt er mer robuste, påvirkes også disse av høyere temperaturer, men i betydelig mindre grad enn membrankledde virus. For mer robuste, ikke-membrankledde virusene kan klimaendringer derfor få andre konsekvenser enn for de mer temperatursensitive, membrankledde virusene. Siden disse virusene både er miljøstabile og kan gi langvarige, kroniske infeksjoner, er det mindre sannsynlig at økende temperaturer alene vil redusere smittepresset. Økte temperaturer kan tvert imot bidra til økt virusreplikasjon i verten og dermed

høyere utskillelse av virus, samtidig som den innebygde robustheten hos slike virus gjør dem mindre sårbare for temperaturindusert inaktivering.

Oppdrettsanlegg med høy fisketetthet kan fungere som store smittekilder ved at virusinfeksjoner opprettholdes, spres mellom fisk, og legger til rette for store sykdomsutbrudd. Dette øker sannsynligheten for smitte til villfisk i nærliggende områder. Vaksiner kan redusere smitte, sykdom og dødelighet, samt virusutskillelse. Antibiotika virker ikke mot virus og kan derfor ikke brukes for å behandle virussykdommer.

4.2.3 Bakterier

Bakterier er i motsetning til virus, generelt sett godt tilpasset et liv utenfor en vert (fisk) og mange fiskepatogene bakterier finnes naturlig i miljøet. Likevel vil endringer i miljøet (saltholdighet, pH, temperatur, oksygen, avrenning / organisk materiale) påvirke overlevelse og muligheten for å infisere en vert. Fiskepatogene bakterier karakteriseres ofte som opportunistiske miljøbakterier. Dette betyr at de er naturlig til stede i miljøet (vannmassene, biofilm og sediment kan fungere som reservoar) og kan forårsake sykdom om miljøforholdene ligger til rette og det er mottakelige verter til stede. Det er i skjæringspunktet og interaksjonen mellom vert, patogen og miljø, utvikling av sykdom kan utvikles (Fig. 4.5). Dersom fisk utsettes for stress og skader (håndtering/behandling eller hurtige miljøforandringer), kan de bli mer utsatte for utbrudd av latente infeksjoner i tillegg til sekundærinfeksjoner (en ny infeksjon som kommer etter en første primærinfeksjon, fordi fisken er svekket).

Hvordan klimaeffekter vil påvirke sykdomsutbrudd og smittespredning vil være patogen-spesifikke og avhenge av hvor godt bakterien er tilpasset de nye miljøforholdene. Ekstremvær kan endre miljøforholdene mye på kort tid. Slike endringer kan være mer fordelaktig for hurtigvoksende opportunistiske bakterier og resultere i hurtige skift i mikrofloraen (Pettersen et al., 2021). Vibrionaceae er en divers familie med miljøbakterier som er svært tilpasningsdyktige, har et stort vertsregister og hvor mange er ansett for å være opportunistiske patogener (Manchanayake et al., 2023). To fiskepatogene bakterier i *Vibrio*-slekten kjent fra norske farvann er *Vibrio anguillarum* (Manchanayake et al., 2023) som forårsaker klassisk vibriose og *Aliivibrio salmonicida* som forårsaker kaldtvannsvibriose. Her omtales et utvalg av bakterieinfeksjoner hvor det har vært observert en endring i akvakulturnæringen de siste årene.

Sår forårsaket av bakterier er et alvorlig velferdsproblem for oppdrettsfisk som også kan forårsake dødelighet. Vintersår, forårsaket av kaldtvannsbakterien *Moritella viscosa*, forekommer oftest ved kalde temperaturer (under 10 ° C). Bakterien vokser ikke ved temperaturer over 15 ° C (Lunder et al., 1995), og en økning i vanntemperaturer kan derfor redusere utbruddsvarighet i farvann eller forskyve sesongen for utbrudd til tidligere på våren eller seinere på høsten når temperaturene er best tilpasset bakteriens vekst og virulens. Andre bakterier som også forårsaker sår hos ulike arter av fisk i det marine miljø er ulike *Tenacibaculum*-arter. Nylig var det påvist utbrudd av arten *Tenacibaculum maritimum* i Norge, som vanligvis forårsaker utbrudd hos oppdrettsfisk i varmere strøk.

I Fiskehelserapporten for 2025, trekker Veterinærinstituttet frem pasteurellose (nå *Phocoenobacter atlanticus* subsp*. atlanticus*) som en bakteriesykdom som kryper nordover. Temperaturøkning er nevnt som mulig årsak. Samtidig er det kjent at sykdomsutbrudd ofte oppstår de første ukene etter lusebehandling og det er derfor ikke utenkelig at utbredelsen nordover er en indirekte årsak som følge av økt behov for avlusning. Sannsynligvis er det en kombinasjon av begge.

Nylige funn av *Piscirickettsia salmonis* (salmon rickettsial septikemi, SRS) på flere lokaliteter i Nord-Norge har sammenfalt med perioder med forhøyet sjøtemperatur. Mye er fortsatt uklart når det gjelder årsakssammenhengene rundt utbruddene. SRS er en alvorlig sykdom som det per idag ikke finnes noen

vaksine mot og er vanskelig å behandle. Det har vært en økning i problemer med SRS i Skottland og Irland. Vi bør derfor være forberedt på at sykdommen også vil kunne øke i norsk lakseoppdrett.

Renibacterium salmoninarum forårsaker den kroniske sykdommen bakteriell nyresykdom (BKD). Det forekommer sporadiske påvisninger av bakterien hos både oppdrett og villfisk, med hovedtyngde i Trøndelags-området. Alvorlighetsgraden av kroniske infeksjoner henger ofte sammen med helsestatusen til fisken og stressede individer med nedsatt immunforsvar vil kunne utvikle alvorlig sykdom. Per i dag finnes det ingen vaksine mot og den er vanskelig å behandle. Bakterien kan også overføres fra stamdyr til avkom (vertikal smitte) (Delghandi et al., 2020).

Saltholdighet kan være en begrensende vekstfaktor for noen bakterier. Økt avrenning og økning i brakkvannslag kan endre miljøforholdene slik at bakterier som er mer ferskvannstilpasset får bedre levevilkår. Et eksempel på meldepliktig sykdom assosiert med lave temperaturer (under 10 ° C) i brakk- og ferskvann er flavobakteriose (*Flavobacterium psychrophilum*) (Donati et al., 2026). I Norge forekommer det oftest utbrudd hos regnbueørret. Sykdommen påvirker primært tidlige livsstadier i elver og bekker, og utgjør dermed en utfordring i oppvekstområdene og har begrenset relevans i marin fase. Økt ferskvannavrenning vil kunne bedre miljøforholdene og dermed overlevelsen og utbredelsen for denne typen bakterier.

Bakterier generelt har mange ulike egenskaper (virulensfaktorer) som benyttes til infisering og formering i verten. En del virulensfaktorer har vist seg å være temperaturavhengig og endringer i temperaturen kan dermed påvirke virulensegenskapene til en bakterie. *V. anguillarum*, som forårsaker klassisk vibriose hos både oppdrettet og villfisk har virulensfaktorer hvor bakterieveksten er både temperatur- og jernavhengig (Hickey & Lee, 2018).

Ulike arter av *Aeromonas*-bakterier forårsaker furunkulose hos både oppdrettet og villfisk. Noen er mer artsspesifikke enn andre. Disse bakteriene er tilpasningsdyktige og finnes både i fersk- og saltvann. Selv om bakterier vokser bedre ved høyere temperaturer, er det ikke gitt at de vil forårsake mer alvorlig sykdom. Det er vist at virulensen til *Aeromonas*-bakterier kan avta (mistes) selv om de vokser godt ved høye tempeteraturer (25 ℃) (Fournier et al., 2025; Stuber et al., 2003). Vaksinering gir i dag oppdrettsfisk god beskyttelse mot utbrudd av både vibriose og furunkulose.

Hvordan klimaendringene vil påvirke bakterielle utfordringer hos oppdrettsfisk og dermed smittepresset til vill laksefisk, er høyst usikkert. Eksemplene over viser noe av kompleksiteten. Det er ikke gitt hvilke bakteriesykdommer som vil øke eller minske i omfang og eller hvordan egenskapene vil endre seg ved gitte endringer i miljøet. Med temperaturøkning vil det være naturlig å forvente en dreining mot utbrudd av sykdommer forårsaket av mer varmekjære bakterier. Et eksempel på dette er *Mycobacterium* spp. som forårsaker mykobakteriose. Mykobakteriose er en kronisk systemisk infeksjon som utvikler seg sakte og det finnes ingen effektiv behandling (Sandlund & Madsen, 2025). Sykdommen har økt i omfang i oppdrett i sørlige deler av Europa og det spekuleres i om dette skyldes et varmere klima (Davidovich et al., 2020). Med økende temperatur forventes også det en forverring av lusesituasjonen og med den økt behov for avlusing. Mer behandling av oppdrettsfisken kan øke stress og skader og dermed gjøre fisken mer utsatt for sykdom. Utbrudd av sår og pasteurellose er ofte assosiert med behandling av fisk i oppdrett. Det er høyst usikkert hvordan en eventuell endring i smittepresset fra denne typen agens vil påvirke vill laksefisk, siden villfisk ikke utsettes for den samme gjentatte påkjenningen som en oppdrettsfisk.

For å minske smittepress fra oppdrett til villfisk det viktig å hindre sykdomsutbrudd og utskillelse av patogener til omgivelsene. Vaksiner er derfor et essensielt forebyggende tiltak og gode beskyttende vaksiner har vært helt nødvendig for utvikling av den oppdrettsnæringen vi har i Norge i dag. Bakterier er kjent å kunne endre

egenskaper (virulensfaktorer) hurtig. Slike endringer kan komme som følge av ytre påvirkninger (f.eks. klimaendringer) eller gjennom naturlig mutasjon og seleksjon. Et nylig eksempel på slike forandringer som resulterte i behov for endring av vaksiner, er problematikken rundt vintersår (*Moritella viscosa*). Dette viser også behovet for kontinuerlig overvåking av denne typen endringer for å fange dem opp på et tidlig tidspunkt.

Per nå er det lav bruk av antibiotika til behandling av bakterielle infeksjoner. Med endringer som beskrevet over, er det heller ikke utenkelig at behovet for medikamentell behandling av bakteriesykdommer vil øke i en overgangsperiode, hvor sykdomsutbrudd forårsaket av nye og eller endrede bakterier forekommer og inntil forbedrede vaksiner kan benyttes.

4.2.4 Parasitter

Parasitter innbefatter en rekke typer encellede organismer samt flercellede dyr som innvollsorm og krepsdyr. De encellede parasittene kan ha enkle direkte livssykluser tilsvarende hos virus og bakterier, men mange har kompliserte livssykluser med flere verter. De fleste innvollsormene har kompliserte livssykluser med to eller flere verter. De fleste parasittene hos oppdrettsfisk har derimot direkte smitte, som vil si at en økning i antall smittet oppdrettsfisk også øker risikoen for videre smitte til villfisk. Blant disse er større parasitter som lakselus *(Lepeophtheirus salmonis)*, skottelus (*Caligus elongatus*) og encellede organismer som costia (*Ichthyobodo* spp.), trichodina (*Trichodina* spp.) og gjelleamøber (*Paramoeba perurans*). Ettersom lakselus er en av de største utfordringene knyttet til bærekraftig fiskeoppdrett er denne utfordringen adressert i mer detalj i et eget delkapittel 4.3.

Relevante parasitter med to-verts livssykluser er laksens bendelorm *Eubothrium crassum*, og myxozoer, f.eks. *Parvicapsula*. Laksen får i seg bendelormlarver fra visse plankton copepoder (Saksvik et al., 2001), eller kan smittes med *Parvicapsula* etter kontakt med sporer frigjort fra en flerbørstemakk (Erlingsdóttir & Kristmundsson, 2026).

Mellom infeksiøse organismer og laks er det normalt en balanse (parasitt - vert); fiskens immunforsvar er i stand til å begrense parasittens oppformering, slik at infeksjonene ikke blir alvorlige, men parasitten kan leve og reprodusere på verten. Ved ubalanse, slik som immunsvekkelse hos laksen, kan det følgelig oppstå kraftige og mer skadelige infeksjoner. Også dersom parasittens reproduksjon øker med temperaturen og vertens bekjempelses evne ikke følger tritt, kan det utvikles sykdom. Dette kan være et relevant scenario i et varmere klima. At laksefisk utvikler sykdom som følge av normalt harmløse infeksjoner når temperaturen blir høy, er observert flere ganger. Et eksempel er tarm-spironucleose (*Spironucleus salmonis*) hos parr (Roberts & Shepherd, 1974) denne tarmflagellaten synes å være harmløs ved «normale» temperaturer (Ferguson, 1979). Et annet eksempel er PKD (proliferativ nyresykdom) hos ville laksefisk. PKD parasitten (*Tetracapsuloides bryosalmonae*) er alminnelig forekommende hos parr av aure og laks i Norge, uten å forårsake sykdom. I forbindelse med høye vanntemperaturer utviklet disse naturlige vertene sykdommen (PKD) (Sterud et al., 2007), som involverer en abnorm oppformering av parasitten. Årsaken var sterkt redusert vannføring (regulerte vassdrag) og varmt vær, med temperatur opp mot og dels over 20°C (Sterud et al., 2007). Når det gjelder denne parasitten kan det også spille inn at hovedverten, en type mosdyr, kan bli mye vanligere i varmere vann. Hvis de økte mengdene mosdyr smittes med PKD-parasitten, kan de frigjøre mere sporer og utsette laksefiskungene for et høyere smittepress.

En meget problematisk parasitt i sjøoppdrett av laks er amøben *Paramoeba perurans*. Amøber svever i vannet og slår seg ned på laksens gjeller om høsten, oppformerer seg ved celledelinger og danner kolonier som etter hvert er synlige for oss uten hjelpemidler. De slimete lyse flekkene har enormt med amøber, som dekker skadd eller ødelagt dødt gjellevev. Uten behandling kan laksen dø. Sykdommen kalles AGD (amoebic gill disease).

AGD utbredelsen har både i Norge og andre land blitt knyttet til temperatur (Oldham et al., 2016). Etter de første påvisningene på Vestlandet i 2006 har forekomsten av amøben og sykdommen tilsynelatende ekspandert nordover, og har nådd Helgeland (Moldal et al., 2026). Det er rimelig å knytte dette til økende sjøtemperaturer, og AGD vil være en trussel mot lakseoppdrett i et varmere klima. En begrensende faktor for amøben er saliniteten, den overlever ikke lenge i brakkvann og er derfor ualminnelig hos laks inne i fjordene hvor saliniteten i overflatevannet er lav. AGD behandles gjerne også med ferskvann eller brakkvann. Økende avrenning og endrede vannforhold kan følgelig påvirke både forekomst av AGD og spredning av amøber.

I oppdrettsanlegg med åpne merder smittes laksen tidlig høst og utvikler AGD utover høsten, gjerne ved fallende temperatur. Om vinteren forsvinner amøben fra fiskene, og laksen er som regel amøbefri i en periode vår-sommer. Trolig overlever amøben da i dypvannet (Karlsbakk, 2015; VKM, 2014).

Fisken i anlegg med AGD frigjør store mengder amøber til overflatevannet utover høsten, som trolig kan overleve fritt i vannet i flere uker (Blindheim et al., 2023). Likevel er smitte fra oppdrettsanlegg til villfisk ikke blitt påvist. Laksesmolt som vandrer ut om våren-forsommeren vil ikke bli eksponert for amøber. Tilbakevandrende laks vil også neppe bli påvirket, ettersom de vil gå inn i brakkvann og etter hvert vandre opp i ferskvann. Sjøaure som ikke vandrer tilbake til ferskvann om høsten kan tenkes å bli eksponert, og arten kan smittes og utvikle AGD (Powell et al., 2008). Men igjen er det slik at sjøaure som står i sjø gjennom vinteren hovedsakelig vil holde til i estuarier med brakt vann, der de neppe blir eksponert eller utvikler AGD. Andre villfisk langs kysten, som små rognkjeks og leppefisk kan derimot tenkes å bli utsatt for smittepress om høsten, i tareskogene i ytre kyststrøk. Disse fiskeartene er funnet å kunne utvikle sykdommen.

«Desmo» (*Desmozoon lepeophtherii= Paranucleospora theridion*) er en mikrosporidie-parasitt som invaderer gjelle, tarm og hudepitelet hos laks og trolig andre laksefisk hvor den danner sporer inne i cellenes kjerner. Parasitten oppformerer seg i tillegg i fagocytter, viktige immunceller i fiskens blod og vev. Denne oppformeringen er sannsynligvis temperaturavhengig (Sveen et al., 2012). Lakselus som beiter på fiskens hud får i seg sporer av parasitten, og blir smittet. Voksne lus kan bli fulle av parasittsporer utover høst-vinter, men det er uavklart hvordan sporer fra lusen smitter laksen. Derimot vil sporer fra fiskens hud frigjøres i vannet, og disse vil trolig kunne smitte andre laksefisk direkte (Karlsbakk et al., 2015). Smittepresset med denne parasitten er svært stort på Vestlandet, alle oppdrettslaks synes å bli infisert i løpet av en produksjonssyklus (Blindheim et al., 2023; Karlsbakk et al., 2015). Parasitten er knyttet til flere sykdomstilstander. Der er en sterk kobling mellom gjellesykdom hos laksen om høsten og høye tettheter av parasitten i gjellene. Der er også en kobling til taperfisk, fisk med lav kondisjonsfaktor har mye høyere tettheter av parasitten i gjellene enn fisk med normal og høy kondisjon (Gunnarsson et al., 2017). Høstsyka hos laks er også knyttet til kraftige infeksjoner med denne parasitten (Karlsbakk et al., 2015). Villaks og sjøørret på Vestlandet eksponeres for smitte i sjøfasen, og kan ha høy prevalens når de tas i elv om høsten. Ørreten synes mere resistent, selv om den trolig eksponeres i høyere grad enn laksen, har den som regel ikke kraftige infeksjoner. Effekten parasitten har på villfisk er ukjent. Et stort problem når det gjelder vår kunnskap om «Desmo» er at det ikke har lyktes å gjøre meningsfulle smitteforsøk med parasitten, som en ikke kan dyrke i laboratoriet.

Laksens bendelorm *Eubothrium crassum* er alminnelig forekommende i oppdrettslaks på Vestlandet og i Midt-Norge. Bendelormen lever i laks og ørret både i ferskvann og i sjø, og kan gjennomføre livssyklusen begge steder. Oppdrettslaksen smittes i sjømerder når de spiser zooplankton fra vannet, visse copepoder (hoppekreps) bærer på bendelormlarver. Den voksne parasitten lever i tarmen på laksen og stjeler næring fra fisken, men vil normalt ikke skade oppdrettslaks. Vekstrate og tilvekst per kg fôr blir dermed redusert, så økte kostnader i produksjonen er hovedeffekten. Hos villfisk, som har betydelig mer begrenset tilgang på næring enn oppdrettsfisken, ser en effekter som redusert blodprosent og kondisjon. Bendelormen er ikke påvist å smitte

laks i sjøoppdrett i Nord-Norge (Hansen et al., 2022). Dette er et mysterium, parasitten forekommer i både utvandrende sjøørret og i tilbakevandrende villaks i Troms og Finnmark. Trolig er viktige copepod-mellomverter mer uvanlige i nord, og det synes rimelig at temperatur er en begrensende faktor. Følgelig vil bendelormproblemet i oppdrett av laksefisk kunne bre seg nordover i et varmere klima. Dette kan øke smittepresset i regioner hvor parasitten nå er uvanlig i sjø.

Introduksjon og spredning nordover av organismer som er sluttverter eller mellomverter for parasitter kan endre smittebildet og smittepresset på oppdrettsfisken (Atroch et al., 2026). Et sannsynlig eksempel er den myxozoe parasitten *Kudoa thyrsites*, som kan gjøre fileten til angrepet fisk bløt etter slakt, altså et kvalitetsproblem- ikke en sykdom. Slik fisk er egentlig uomsettelig, men tilstanden kan oppstå og dermed oppdages først etter flere døgn eller etter at frosset fisk blir tint. Både laks og torsk kan smittes av vannbårne sporer frigjort fra en foreløpig ukjent art børstemakk (Giulietti et al., 2025; Jones & Long, 2022). Parasitten smitter altså ikke direkte, så der er ikke direkte smittefare mellom oppdrettsfisk og villfisk. Smittepresset synes mye høyere sør i Europa, det er trolig lavt i de norske fjordene der parasitten ikke er påvist i oppdrettsfisk ennå. Følgelig kan den involverte børstemakken være uvanlig i våre farvann. Dette kan tenkes å endre seg i et varmere klima.

4.2.5 Fremmede agens og nye verter

I Norge har de alvorligste sykdomsutbruddene hos villfisk vært knyttet til introduksjon av patogener som ikke naturlig hører hjemme i våre farvann (Bakke & Harris, 1998; Egidius, 1987; Hjortaas et al., 2016; Johnsen & Jensen, 1994; Karlsen et al., 2014). Klimaendringer kan øke sannsynligheten for at nye patogener etableres ved å forskyve utbredelsen til verter, patogener og vektorer, endre migrasjonsmønstre og andre sesongavhengige hendelser, og skape nye interaksjoner, reservoarer og alternative verter (Chaikin et al., 2026; Dunn & Hatcher, 2015; Pfenning-Butterworth et al., 2024; Poulin et al., 2011).

I tillegg kan introduserte arter forsterke effekten av allerede hjemlige sykdommer ved å fungere som nye smittebærere i økosystemet. Dette kan skje både gjennom smitte overføres oppdrettsfisk til villfisk («spillover»), og gjennom at villfisk fører smitte tilbake til oppdrettsfisk (“spillback”). Slike interaksjoner kan bidra til å opprettholde eller øke smittepresset i områder, og øker samtidig risikoen for smitte til villfiskbestander – også i områder som i dag er uten kjent smitte.

Et aktuelt eksempel er pukkellaks, som opprinnelig stammer fra utsetting i Russland, men hvor klima-relaterte endringer antas å være en forsterkende faktor for artens forekomst og ekspansjon (VKM, 2020). Dersom pukkellaks tar opp smitte fra oppdrettsanlegg – for eksempel salmonid alphavirus (SAV), som forårsaker pankreassykdom (PD) – kan arten potensielt spre smitte videre både til andre oppdrettsanlegg og til ville bestander utenfor etablerte PD-soner (VKM, 2020). Dette innebærer at pukkellaks potensielt kan fungere som en “brovert” som både forsterker smittepresset i oppdrett og øker sannsynligheten for smitte til villfisk, inkludert bestander som tidligere har vært lite eksponert.

Klimaendringer kan gi en generell geografisk forskyving av sykdommer, men uten at dette gir seg utslag i en faktisk økning i sykdomstilfeller eller -belastning (Lafferty, 2009). Det er også mange andre faktorer som påvirker om nye vertsarter og eksotisk agens kan eller vil etablerer seg, inkludert spredningsbarrierer, habitatforhold, biotiske interaksjoner og menneskelig aktivitet (Altizer et al., 2013; Lafferty, 2009). Det trolige utfallet av klimaendringer for risikoen knyttet til fremmede patogener er derfor en kombinasjon av geografisk forskyvninger, nye vert–patogen-kombinasjoner, og at enkelte eksotiske, eller nye opportunistiske, agens vil gi sykdomsutfordringer (Altizer et al., 2013; Lafferty, 2009).

4.2.6 Oppdrettslaks og vill laksefisk i et klima i endring

Denne rapporten vurderer hvordan klimaendringer kan påvirke risikoen for smitteoverføring fra oppdrett til vill

laksefisk. Kunnskapen vi har i dag om både mottagelighet og konsekvenser av smitte med relevante patogener i fisk kommer hovedsakelig fra oppdrett og smitteforsøk. Selv om det kan være forskjeller i infeksjons- og sykdomforløp mellom vill og oppdrettet fisk, og hvordan dette påvirkes av klimaendringer, er det sannsynlig at kunnskapen er dels relevant og overførbar. Det er likevel et problem at få studier belyser forekomst og konsekvenser av smitte under naturlige betingelser med lave tettheter av patogen og/eller vert (fisk), samt under høyt predatorpress. I vurderingen av hvordan klimaendringer påvirker smitterisikoen mellom oppdrett og villaks, er det derfor nødvendig å kombinere kunnskap fra oppdrett med økologiske forhold som er spesifikke for den ville laksefisken sitt miljø.

Oppdrettslaks og villfisk lever under svært forskjellige betingelser, noe som vil påvirke effektene av klimaendringene. Oppdrettslaksen kan bli utsatt for ugunstig miljøbetingelser siden de har begrenset mulighet til å velge hvor de vil være, og det er andre stressorer knyttet til oppdrettssituasjonen som ikke finnes i naturen (f.eks. håndtering og avlusing). I tillegg vil oppdrettsfisk i større grad oppleve kronisk stress. Dette øker sannsynligheten for sekundærinfeksjoner. I oppdrett er smittet/syke individer også beskyttet i merden og kan derfor bidra til å opprettholde smittepress siden tettheten av verter er høy. I motsetning til oppdrettslaksen, vil vill laksefisk i større grad selv kunne velge det miljøet de foretrekker. Klimaendringer kan bidra til å redusere denne handlingsfriheten. Vill laksefisk vil oppleve varierende fødetilgang, lavere tetthet av artsfeller, samt at predasjon vil fjerne svake og sykdomsutsatte/syke individer. Mange av disse faktorene er selv påvirket av klimaendringene, og den samlede effekten på villfisk er mer komplisert å forutsi. En annen vesentlig forskjell mellom de to miljøene er også at oppdrettslaks kan vaksineres, noe som ikke er tilfelle for villaksen.

Et annet aspekt knyttet til smittespredning mellom oppdrettet og vill laksefisk, som kan påvirkes av den ville laksefiskens miljø, er at rømt oppdrettslaks som bærer patogener kan representere en større smitterisiko i et varmere elvemiljø. Høy temperatur i elver som konsekvens av ekstremvær kan føre til sykdomsutvikling i smittebærende fisk. Sykdomsutviklingen, høy temperatur og økt vertstetthet (i tørkeperioder) vil kunne skape forhold med intens smitte og sykdomsspredning på gyteplassene som kan rammer villaksen hardt, spesielt juvenile. Tilførsel av patogener fra oppdrett, via smittebærende/syk rømt oppdrettslaks, vil potensielt kunne forsterke denne effekten (Madhun et al., 2015; Madhun et al., 2024; Madhun et al., 2017).

4.2.7 Oppsummering

De siste års erfaringer fra oppdrettsnæringen indikerer at endringer i sykdomsforekomst hos oppdrettsfisk som følge av klimaendringer allerede skjer. Det rapporteres om klima- og miljørelaterte endringer som påvirker fiskehelse gjennom økt behov for lusebehandling, endringer i vannkvalitet, økning i nye infeksjonssykdommer, økende dødelighet ved håndtering av fisk og redusert oksygenmetning (Moldal et al., 2026). Det er utfordrende å si hva dette medfører for villfisken, da det på generelt grunnlag er behov for mer kunnskap om smittespredning fra oppdrett til vill laksefisk.

Generelt forventes det en forverring av sykdomsbildet som følge av klimaendringene, spesielt ved temperaturøkning. Men, de forventede klimaendringer vil ikke nødvendigvis gi en enkel, ensrettet økning i sykdom for alle agens. Det vil være et komplisert samspill mellom endringene i miljøet, verten og patogenene, og utfallene vil variere.

Forståelse av vert-patogen interaksjoner under ulike miljøforhold og i et samlet økologisk bilde er et nødvendig utgangspunkt for å forstå fremtidige smitterisiko for villfisk og oppdrettsfisk.

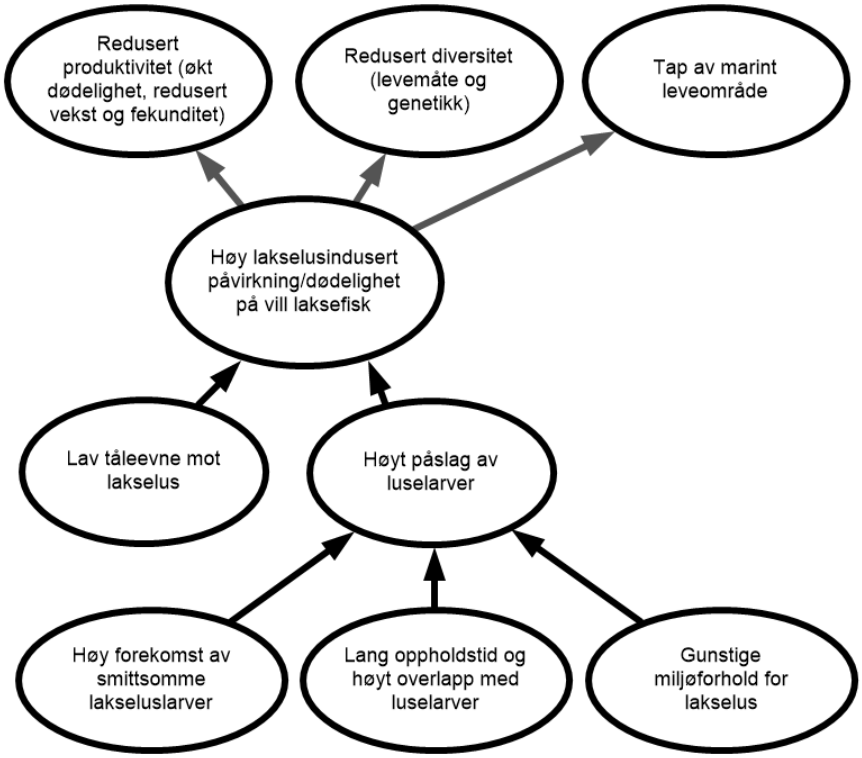
Samlet sett er det store kunnskapshull knyttet til hvordan miljø generelt, og klimaendringer spesielt, påvirker samspillet mellom vert, patogen og miljø. For å få bedre oversikt over dette kan det være nødvendig å gjennomføre en risikovurdering av hver enkelt patogen. Det vil også være behov for omfattende

kunnskapsoppbygging og en tverrfaglig tilnærming der kunnskap om verter, patogener og miljø kobles til oversikt og forståelse av klimaendringene og marin økologi generelt.

4.3 Lakselus

4.3.1 Introduksjon

Vurderingen av forventet klimaendringers påvirkning på risikobildet for lakseluspåvirkning av ville laksefisk tar utgangspunkt i strukturen for risikovurdering i «Risikovurdering Norsk Fiskeoppdrett 2025» der risikokilder, hendelser og konsekvenser struktureres og visualiseres gjennom risikokart (fig. 4.1). I denne gjennomgangen vurderer vi hvordan lakselusindusert dødelighet hos utvandrende postsmolt laks, og negative effekter på sjøørret og røye, kan endres i fremtidens klima. Dette gjør vi gjennom å se på effekten av forventede temperaturendringer og ekstremhendelser på sannsynlighet og kunnskapsgrunnlag for hver risikokilde, hendelse og konsekvens.



Figur 4.1. Visualisering av risiko for den uønskede hendelsen «Høy lakselusindusert påvirkning/dødelighet på vill laksefisk» og det tre resulterende konsekvensene. I en risikofremstilling beskrives sannsynlighet og kunnskapsstyrke med fargen i hhv. nodene og ringene rundt.

4.3.2 Vurdering av klimaendringer på lakselus

Høy forekomst av smittsomme lakseluslarver

Produksjonen av lakseluslarver bestemmes både av hvor ofte hunnlus produserer eggstrenger og hvor mange egg hver streng inneholder (Hamre et al., 2019). Kroppsstørrelsen påvirkes igjen av veksthastighet og temperatur, og lus blir generelt mindre når temperaturen øker (Samsing et al., 2016; Thompson et al., 2023). Store hunnlus produserer flere egg enn små lus (Samsing et al., 2016; Thompson et al., 2023). Samtidig fører økt temperatur til raskere klekking og hyppigere produksjon av eggstrenger, slik at den totale larveproduksjonen

øker. Effekten av temperaturøkning er størst ved lave temperaturer (Hamre et al., 2019), noe som innebærer at temperaturøkning forventes å få størst betydning i nordlige områder. Økt temperatur styrker også lusens smitteevne, (Dalvin et al., 2020; Sandvik et al., 2021; Skern-Mauritzen et al., 2020) . Endringene i smitteevne er størst ved lave temperaturer og effekten forventes derfor å være størst i nordlige områder.

Larveutviklingen går også raskere ved høyere temperatur, slik at tiden fra klekking til infeksiøst kopepodittstadium blir kortere (Brooker et al., 2018; Samsing et al., 2016). Raskere utvikling kan føre til lavere dødelighet hos larvene som følge av at de rekker å infisere fisk før de selv blir spist eller dør av andre årsaker (Sandvik et al., 2021). Overlevelsen i planktonfasen er dårlig kartlagt og trolig svært variabel (Brooker et al., 2018). Høyere temperatur gir kortere overlevelse uten vert og kan dermed redusere larvenes transportdistanse (Huserbråten & Johnsen, 2022; Samsing et al., 2016; Skern-Mauritzen et al., 2020). Samtidig øker smitteevnen til kopepoditter kraftig med temperaturen (Dalvin et al., 2020; Sandvik et al., 2021; Skern-Mauritzen et al., 2020).

Samlet sett tilsier dette at framtidige temperaturøkninger vil gi høyere smittepress (Bjørn et al., 2007; Grefsrud et al., 2026; Nilsen et al., 2025; Stige et al., 2025) slik som i forbindelse med den MHW i 2024 (Gonzalez et al., 2025). Hvor stor del av økningen som skyldes høyere lusetetthet, og hvor mye som skyldes økt smitteevne, er undersøkt i Sandvik et al. (2021), der smitteevnen indikeres å være den viktigste faktoren. Dog er det stor usikkerhet knyttet til dødeligheten til larvene.

Vi vurderer at sannsynligheten for «Høy forekomst av smittsomme lakseluslarver» vil øke under den forventede temperaturøkningen. Vi vurderer at kunnskapsgrunnlaget er sterkt, tross usikkerhet om effekten av dødelighet i planktonfasen, særlig fra predasjon.

Lang oppholdstid og høyt overlapp med luselarver

For at villfisk skal kunne smittes av lakselus må den oppholde seg i vannmassene der de smittsomme larvestadiene av lakselus finnes. Klimaendringer forventes å påvirke vandringsmønsteret – og dermed overlappet mellom lakseluslarver og atlantisk laks, sjøørret og sjørøye.

Hos laksesmolt, som vanligvis passerer raskt gjennom fjord- og kystområder, bestemmes eksponeringen i hovedsak av utvandringstidspunkt, rute og progresjonshastighet. Siden lusetettheten øker utover våren og sommeren, regnes tidlig utvandring og kort oppholdstid i fjorden som gunstig. Smoltutvandring styres av temperatur og vannstand, og høyere vårtemperatur kan føre til tidligere og mer konsentrert utvandring, slik det er vist i flere bestander (Kennedy & Crozier, 2010; Kovach et al., 2013; Taylor, 2008). Samtidig gir økt temperatur høyere smittepress, slik at tidligere smoltutvandring ikke nødvendigvis reduserer sannsynligheten for overlapp hvis larveproduksjonen for lakselus forskyves tilsvarende. Videre kan ferskere overflatevann medføre at luselarvene lar seg synke til dypere vannlag, og dermed potensielt redusere eksponeringen. Klimaendringer kan påvirke både rutevalg og utvandringshastighet hos utvandrende laksesmolt, gjennom endringer i temperatur, saltholdighet og mulig endret sirkulasjon. Dette kan igjen endre den romlige og tidsmessige eksponeringen for lakseluslarver, men det er vanskelig å forutsi om slike endringer vil føre til økt eller redusert overlapp mellom utvandringsruter og områder med høy lusetetthet.

For sjøørret og sjørøye, som i motsetning til laks oppholder seg lenge i kystsonen, vil overlappet med lakselus avhenge i hovedsak av lengden på det marine oppholdet. vil økende temperaturer og hyppigere marine hetebølger kunne øke den samlede eksponeringen for lakselus mer enn for laks. Samtidig kan begge disse artene oppsøke områder med lav saltholdighet for å gjenvinne saltbalanse og kvitte seg med lus. Endrede nedbørsmønstre med mer regn om sommeren (særlig i nord) kan gi flere områder med redusert smittepress, men dette vil bare forekomme episodevis. Samlet vil klimaendringer påvirke tidsmessig og romlig overlapp

mellom vill laksefisk og lakselus gjennom endringer atferd, hydrografi og livshistorier.

Samlet vurderer vi at det ikke er grunnlag for å konkludere om sannsynligheten for «Lang oppholdstid og høy overlapp med luselarver» vil øke eller avta under forventede klimaendringer. På grunn av stor kunnskapsmangel knyttet til både biologiske responser vurderes kunnskapstyrken som svak. Samtidig forventer vi, forankret i svak kunnskap, at klimaendringer isolert sett ikke vil gi store utslag på denne faktoren sammenlignet med andre faktorer i vurderingen.

Gunstige forhold for lakselus

Lakselus utvikler seg raskere ved høyere temperaturer, og effekten av temperaturøkning er størst ved lave temperaturer (Hamre et al., 2019). For eksempel reduseres utviklingstiden fra smitte til voksne hunnlus med rundt 7 dager når temperaturen øker fra 7 °C til 8 °C (fra 48 til 41 dager), mens endring fra 10 til 11 °C forkorter utviklingstiden med rundt 4 dager (fra 36 til 32 dager). Høyere temperatur gjør derfor at lakselus når reproduktiv alder tidligere, men raskere vekst gir også litt mindre lus med noe færre egg i hver eggstreng (Thompson et al., 2023). Selv om lakselus tåler temperaturer opp mot 24 °C, vil vertsfisk søke dypere og kjøligere vann ved høye overflatetemperaturer (Stehfest et al., 2017), og klimaendringer forventes derfor ikke å gjøre forholdene for varme for lakselus.(Stehfest et al., 2017), og klimaendringer forventes derfor ikke å gjøre forholdene for varme for lakselus.

I de områdene som får økt nedbør kan vi få økt brakkvannsbeskyttelse for sjøørret og sjørøye, som bruker ferskvannsfelt til å redusere lusepåslag. I sør kan mer vårflom være ugunstig for lakselus, mens mindre sommernedbør kan redusere beskyttelsen for sjøørret hvilket er gunstig for lakselus. I Nordland, Troms og Finnmark kan økt nedbør gi noe mindre gunstige forhold for lakselus og noe økt beskyttelse, særlig for ørret og røye.

Den samlede effekten av de forventede klimaendringene er hovedsakelig positive for lakselusen, både en økning i gjennomsnittstemperatur og økt frekvens av marine hetebølger. Det er imidlertid usikkerhet knyttet til om en endret nedbørsprofil (tidspunkt og mengde ferskvann) kan ha en dempende effekt. Vi konkluderer likevel med at det vil være økt sannsynlighet for gunstige miljøforhold for lakselus, og kunnskapsgrunnlaget for denne konklusjon anses som sterkt selv om det mangler kunnskap om den presise effekten av ferskvannspåvirkning og ekstremhendelser.

Høyt påslag av luselarver

Sannsynligheten for «Høy forekomst av smittsomme lakseluslarver» forventes å øke med de forventede klimaendringene, og smitteevnen til den enkelte lakseluskopepoditt øker sterkt med økende temperatur. Vi forventer derfor at sannsynligheten for «Høyt påslag av luselarver» vil øke. Dette forventes spesielt for sjøørret og sjørøye som oppholder seg lengre enn laksen i områder med høyt smittepress. På grunn av manglende kunnskap om effekten på lang oppholdstid – som kan reduseres av at sjøørret og sjørøye vandrer tilbake til ferskvann på grunn av lusepåslag, vurderer vi kunnskapsgrunnlaget som moderat.

Lav tåleevne mot lakselus

Tåleevnen mot lakselus beskriver i hvilken grad en fisk tåler å bli infisert og kan forstås som et mål på hvor robust fisken er mot skadevirkninger av lusepåslag. Tålegrenser er i stor grad bestemt av fiskens størrelse, slik at større fisk tåler flere lakselus enn små fisk. Her oppsummeres de viktigste faktorene som påvirker fiskens tåleevne.

Størrelse på fisk er avhengig av fødetilgang og energiforbruk både i ferskvannsfasen før smolten vandrer ut og for vekst i sjøen. Tilgang på føde er som nevnt i innledningen avhengig av samsvar mellom utvandringstidspunkt og tilstedeværelse av byttedyr. For laks er det dokumentert nedsatt vekst i sjøen korrelert

til reduksjon av arktisk vann og økt vårtemperatur i sjøen siden 2004 (Vollset et al., 2022).

God helse gir generelt høyere tåleevne mot lakselus. Økte sjøtemperaturer, særlig i beiteperioden for sjøørret og sjørøye, påvirker både fysiologi og immunforsvar. Høyere temperatur øker stoffskiftet og dermed energibehovet (se kap. 3 om velferd). For laks, som vandrer ut i relativt kjølige vannmasser, forventes moderate temperaturøkninger på grunn av klimaendringer ikke å gi negative effekter. For sjørøye og sjøørret, som oppholder seg lenge i kystsonen, kan høyere sommertemperaturer og marine hetebølger gi fysiologisk stress, spesielt for røye som er tilpasset kaldt vann. Røye er allerede begrenset til nordlige områder og kan derfor ikke flytte seg nordover for å kompensere for økende temperaturer. Kunnskapen om temperatureffekter på immunforsvaret i laksefisk er begrenset, men økte temperaturer kan øke risikoen for sekundære infeksjoner som følge av luseskader.

Samlet vil klimaendringer påvirke fiskens tåleevne mot lakselus gjennom endringer i fødetilgang, og helse. Effektene forventes å være hovedsakelig negative, særlig for sjøørret og sjørøye. Klimaendringer kan dermed forstyrre evolusjonært utviklet tilpasning til miljøet, noe som kan redusere overlevelsen i mange bestander. Den spesifikke effekten av klimaendringer på tåleevne mot lakselus hos de tre artene av laksefisk har vi meget begrenset kunnskap om og kunnskapsstyrken vurderes derfor som svak.

Negative effekter og høy dødelighet hos vill laksefisk som følge av lakselus

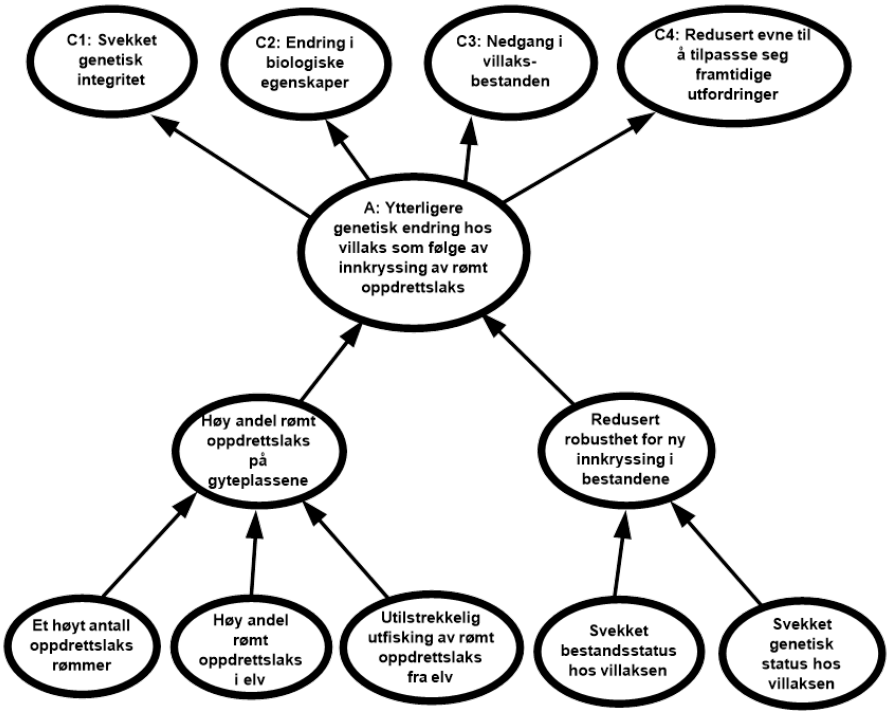
Klimaendringer fører til høyere sjøtemperaturer som akselererer lakselusas reproduksjon, utviklingshastighet og smitteeffektivitet. Den marine hetebølgen som rammet Troms og Vest-Finnmark sommeren 2024 illustrerte dette tydelig, med en dramatisk økning i smittepress både i merder og på villfisk. Ettersom lakselusproblemene har vært størst på Vestlandet og i Midt - Norge, har mye av veksten i oppdrettsnæringen de siste årene skjedd i Nord - Norge. Denne regionen har tidligere hatt kaldere sjøområder og mindre oppdrett, og dermed lavere smittepress og en mindre utviklet kapasitet til å behandle lakselus. Det har i de sener år vært en markant økning i oppdrettsproduksjon i nord, noe som har gitt flere verter for lakselus og økt spredning i miljøet. Dette forventes å føre til større belastning på villfiskpopulasjoner fra vassdrag som hittil har vært lite påvirket.

Nord-Norge huser mange av landets lakseførende elver, i tillegg til alle vassdrag med anadrom røye, siden sjørøye bare finnes i de tre nordligste fylkene. Røyas nordlige utbredelse skyldes dens tilpasning til kaldt vann, noe som også gjør arten spesielt sårbar for temperaturøkning. Det er dokumentert at sjørøye får redusert vekst og kan vende for tidlig tilbake til ferskvann selv ved svært lave lusenivåer (<0,05 lus per gram fisk). Med antatt økning i smittepress fra lakselus og økt vanntemperatur vurderes det at sjørøya vil være den mest klimautsatte av våre laksefiskarter. En svekket sjørøye vil samtidig gi et konkurransefortrinn til andre laksefisk, særlig sjøørret, som deler habitat, byttedyr og leveområder.

4.4 Rømt laks

4.4.1 Introduksjon

De forventede effektene av klimaendringer på risikoen for «Ytterligere genetiske endringer hos villaks som følge av innkryssing av rømt oppdrettslaks» følger den samme strukturen som beskrevet i "Risikorapport norsk fiskeoppdrett 2026". Kort sagt, vurderes sannsynligheten (lav, moderat, høy) og kunnskapsstyrken (sterk, moderat, svak) for risikokildene, hendelsene og konsekvens som danner grunnlaget for risikovurderingen.. Risikokildene, hendelsene og konsekvens (visualisert som noder) er vist i Fig. 4.2. Her diskuterer vi hvorvidt sannsynligheten og kunnskapsstyrken for den enkelte risikokilde, hendelse og konsekvens forventes å endre seg som resultat av de forventede klimaendringene og hvordan dette vil påvirke risikoen for ytterligere genetiske endringer i villaks gjennom innkryssing av rømt oppdrettslaks.



Figur 4.2: Visualisering av risikokilder, hendelser og konsekvenser for «Ytterligere genetisk endring hos villaks som følge av innkryssing av rømt oppdrettslaks».

4.4.2 Vurdering av klimaendringer på rømt fisk

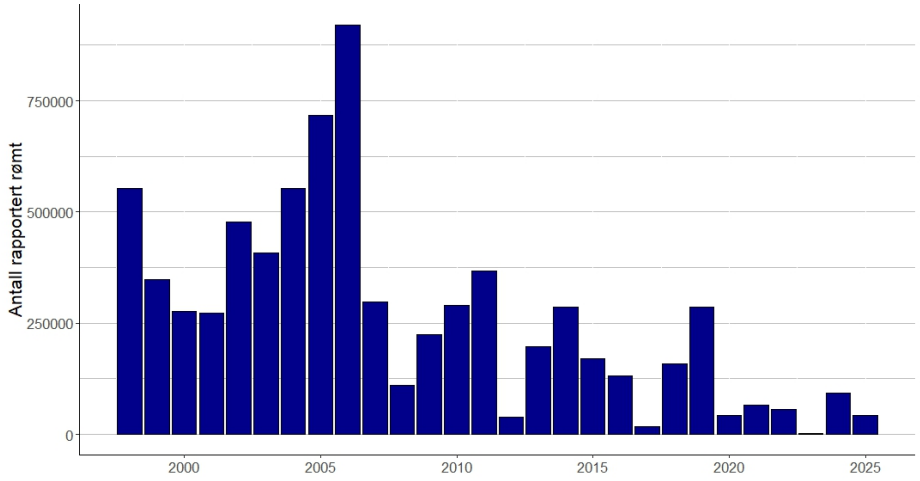
Et høyt antall oppdrettslaks rømmer

Til tross for teknologiske framskritt knyttet til lukkende merder og landbasert oppdrett, produseres atlantisk laks i Norge fortsatt primært i åpne merder. I Norge er det obligatorisk å rapportere rømmingshendelser til Fiskeridirektoratet, og selv om antallet rapporterte rømte oppdrettslaks utgjør et minimumsestimat, kan årsaken til rømmingshendelsene gi økt forståelse av hvorvidt sannsynligheten for ytterligere rømmingshendelser kan øke ved klimaendringer. To studier har undersøkt årsakene til rømningshendelser i Norge: én for perioden 2006–2009 (Jensen et al., 2010) og én for 2010–2018 (Føre & Thorvaldsen, 2021). Begge studiene fant at svikt i teknisk utstyr utgjorde flertallet av rømningshendelsene. Jensen et al. (2010) konkluderer med at ekstremvær var den mest sannsynlige årsaken i perioden 2006–2009, da de fleste tilfellene med stor-skala rømninger skjedde om høsten. Føre and Thorvaldsen (2021) fant at hull i nøtene sto for 76 % av de tekniske feilene, og trakk videre fram at dårlig vær og arbeidsoperasjoner kan økte sannsynligheten for rømming.

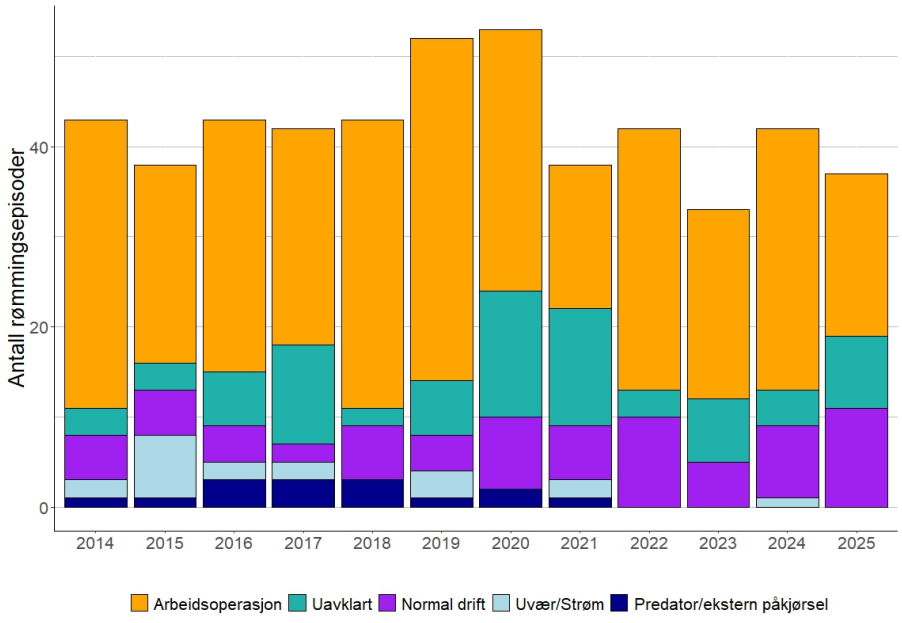
Per i dag rapporterer Fiskeridirektoratet rømmingshendelser i følgende kategorier: Arbeidsoperasjon, Normal drift, Uvær/Strøm, og Predator/ekstern påkjørsel, og Uavklart. Data fra 2014 til 2025 viser at de fleste rapporterte rømmingshendelsene klassifiseres under Arbeidsoperasjon (gjennomsnittlig 62 %), og innenfor den kategorien er avlusning (44 %), flytting av fisk (11 %), håndtering av enkeltfisk (22 %) eller vedlikehold av not (19 %) de vanligste årsakene til en rømmingshendelse. Trendene viser at antallet rapportert rømt oppdrettslaks

har gått ned over tid (Fig. 4.3), mens antallet rapporterte rømmingshendelser de siste ti årene har vært relativt stabilt (Fig. 4.4).

Norsk standard for flytende oppdrettsanlegg, NS 9415, ble innført i 2004 for å redusere rømminger, og en forskrift om krav til teknisk standard for akvakulturanlegg (siste oppdatering: NYTEK 2023) er tett knyttet til denne standarden. Den teknologinøytrale forskriften stiller strengere krav til utstyr benyttet i arbeidsoperasjoner for å forebygge rømming av fisk.



Figur 4.3. Antall rapporterte rømt laks, kilde Fiskeridirektoratet og gjengitt i overvåkningsprogrammet for rømt fisk.



Figur 4.4. Antall rømmingsepisoder per kategori (tallene hentet fra Fiskeridirektoratet sin statistikk).

I fjordsystemene der de fleste oppdrettsanleggene for laks ligger, er det forventet at klimaendringer kan påvirke oppdrettsnæringen direkte ved økt sjøtemperatur, flere marine hetebølger, og mer ekstremvær som stormer. Hvordan disse endringene igjen vil påvirke antallet rømmingshendelser er det manglende kunnskap om. I tillegg kan andre risikokilder som endrer operasjonell drift i næringen som følge av klimaendringer, påvirke antallet rømmingshendelser. For eksempel vil økende sjøtemperatur og flere hendelser av marine hetebølger påvirke produksjon og utbredelse av lakselus (Gonzalez et al., 2025; Sandvik et al., 2021), og dermed kunne føre til et økt behov for avlusning og håndtering av oppdrettsfisk som igjen øker sannsynligheten for en økning i rømmingsepisoder (Thorvaldsen et al., 2015).

Vi vurderer sannsynligheten for at et høyt antall fisk rømmer til å øke med klimaendringer. Først og fremst knyttet til behov for økende antall arbeidsoperasjoner (beskrevet over) men også som følge av økt hyppighet av storm og ekstremvær. Det er sterk kunnskap om at miljøforholdene for lakselus vil bli gunstige, med antatt økning i håndtering av fisk. Det er derimot moderat kunnskapsstyrke om at de nevnte endringene faktisk vil føre til at flere oppdrettslaks rømmer fra oppdrettsanlegg. Samlet sett vurderer vi derfor kunnskapsstyrken som moderat.

Høy andel rømt oppdrettslaks i elv

Andel rømt oppdrettslaks i elv som den risikokilden som vektes tyngst i denne vurderingen. Dette fordi det er en forutsetning at den rømte oppdrettslaksen finner frem til en elv hvis den skal kunne komme seg til gyteplassen og krysse seg med villaks. De fleste oppdrettslaks som rømmer ikke når opp i elven, men dør mens de er i sjøen av sult, predasjon eller andre årsaker. De som går opp i elver gjør ofte dette senere i vandringsperioden enn villaks (Skaala et al., 2025), mens oppdrettslaks mangler hjemstedsinstinkt til en spesifikk elv og kan spre seg over et større område, og overlevelse etter rømming er koblet til livsstadiet og tidspunktet for rømningen (Skilbrei et al., 2015).

Det er observert en høyere andel oppdrettslaks i elver i områder med høy oppdrettsintensitet i nærområdet, i elver med økt vannføring, og i elver der de laksebestanden er svekket og ikke når gytebestandsmålet (Diserud et al., 2022; Mahlum et al., 2021). Lavere andeler oppdrettslaks er observert i elver ved vandringsbarrierer som gjør migrasjonsinnsatsen mer krevende (Diserud et al., 2022; Moe et al., 2016; Sylvester et al., 2018). Det er også en sammenheng mellom tidligere grad av innkryssing i en bestand og sannsynlighet for nye oppgang av rømt oppdrettslaks (Grefsrud et al., 2018).

Dagens klimascenarier antar økte vanntemperaturer og endringer i mengde og sesongmessig fordeling av nedbør og vannføring. Det er vanskelig å vurdere hvordan sannsynligheten for høy andel rømt laks i elv kan endres som følge av dette, siden effektene av endrede miljøforhold i elva kan være uforutsigbare og vil avhenge av antall fisk som rømmer og ved hvilket tidspunkt de rømmer. Økt vannføring kan gjøre det lettere for stor oppdrettslaks å vandre opp i små elver. Omvendt, i perioder med varmt vær og lav vannføring, kan rømlinger være mindre tilbøyelige til å vandre opp i elver med lav vannføring. Hvis oppdrettsnæringen fortsette å øke produksjon i Nord-Norge, kan det øke sannsynligheten for økning i rømt oppdrettslaks i de nordligste produksjonsområdene pga. økt oppdrettsintensitet i regionen.

Vi vurderer sannsynligheten for høy andel rømt oppdrettslaks i elv til å øke som følge av klimaendringer, grunnet økt sannsynlighet for rømming. Dersom klimaendringer fører til en geografisk endring i produksjon, vil det også øke sannsynligheten for en høy andel rømt fisk i elv i områder hvor produksjonen øker, og motsatt i områder hvor produksjon går ned. Vi anser kunnskapsstyrken som lav siden vi har lite kunnskap om hvordan klimaendringer kan påvirker sannsynlighet for rømt oppdrettslaks å vandre opp i elver.

Utilstrekkelig utfisking av rømt oppdrettslaks fra elv

Utfisking organiseres årlig av OURO (oppdrettsnærings sammenslutning for utfisking av rømt oppdrettslaks) som respons på Overvåkingsprogrammets vurdering av andelen rømt laks observert i elver fra året før, men også direkte av forvaltningsmyndighetene i elver som antas berørt av akutte rømmingshendelser. En faktor som påvirker effektiviteten av utfisking, er været og elveforholdene, inkludert vannføring. Hvis klimaendringer fører til mer ekstremvær og periodevis høyere vannføringen, kan det bety at enkelte elver ikke kan ha effektiv utfisking, noe som vil føre til økt sannsynlighet for utilstrekkelig utfisking. Vi vurderer sannsynligheten for utilstrekkelig utfisking av rømt oppdrettslaks fra elv til å øke grunnet klimaendringer. Vi anser kunnskapsstyrken som svak siden vi ikke vet hvordan individuelle elver vil bli påvirket av klimaendringer eller hvor mye dette kan påvirke effektiviteten i utfiskingen.

Høy andel rømt oppdrettslaks på gyteplassene

Gitt at sannsynligheten for «Et høyt antall oppdrettslaks rømmer» og «Høy andel rømt oppdrettslaks i elv», og sannsynligheten for «Utilstrekkelig utfisking av rømt oppdrettslaks» øker, forventes også sannsynligheten for «høy andel rømt oppdrettslaks på gyteplassener» å øke med de forventede klimaendringene. På grunn av manglende kunnskap om hvordan klimaendringer kan påvirke både antall rømt oppdrettslaks, andelen rømt oppdrettslaks i elvene og hvorvidt effektiv utfisking kan gjennomføres, vurderer vi kunnskapsgrunnlaget som moderat.

Svekket bestandsstatus hos villaksen

Reproduksjonssuksessen til en rømt oppdrettslaks avhenger, blant annet, av konkurransen den møter på gyteplassene. En robust villaksebestand har nok individer til å utnytte elvens bæreevne, og produserer nok smolt til at et tilstrekkelig antall gytelaks kommer tilbake som neste generasjon. I risikoanalysens kontekst regnes en robust vill bestand som en bestand som er større enn dens gytebestandsmål og dermed også har et høstningspotensial. Klimaendringer vurderes å være en av det største truslene mot villaks i Norge (VRL, 2025). De potensielle effektene av klimaendringer på laksebestander er grundig gjennomgått i flere studier og rapporter (Jonsson & Jonsson, 2009; Thorstad et al., 2021; VRL, 2021), og viser at villaks kan bli påvirket av klimaendringer i alle livsstadier. Selv om økende vanntemperaturer kan bidra til å øke populasjonene pga. raskere individvekst, kan endringer i utvandringstidspunktet fra elv føre til at smolten forlater elvene på et tidspunkt med dårligere marine forhold, noe som kan påvirke marin vekst og overlevelse til laks. Økt vanntemperatur kan også påvirke smittespredning og gi økt smittepress. Økende ekstremvær som tørke eller flom kan redusere reproduksjonssuksess og overlevelse. Endringer i det marine miljøet vil også påvirke vekst og overlevelse, og forventes å påvirke villaksen negativt.

Sett under ett er det forventet at antall gytende villaks reduseres på grunn av klimaendringer og dermed øker sannsynligheten for svekket bestandsstatus hos ville laksebestander. Grunnet den store variasjonen i miljøforhold hos villaks i Norge, kan villaks i sørlige områder påvirkes annerledes enn villaks i nord. Kunnskapsstyrken vurderes som moderat, ettersom det fortsatt er usikkerhet knyttet til omfanget av klimaendringenes påvirkning på villaksbestander.

Svekket genetiske status hos villaksen

Innkryssing mellom rømt oppdrettslaks og villaks er godt dokumentert i Norge. Norsk institutt for naturforskning (NINA), i samarbeid med HI, har ansvaret for å vurdere den genetiske statusen til ville laksebestander, og den siste publiserte rapporten kom i 2023 (Diserud et al., 2023). Rapporten kategoriserer statusen for hver bestand basert på nivået av innkryssing fra rømte oppdrettslaks i bestanden. Bestandene klassifiseres etter graden av innkryssing som følger: hvis en bestand har mer enn 10 % innkryssing, klassifiseres den som “svært dårlig”, og som “dårlig” ved mellom 4–10 % innkryssing. Et høyt nivå av genetisk innkryssing fra rømt oppdrettslaks antas å ha en negativ effekt på villaksbestanden, ettersom flere studier har vist at oppdrettslaks og deres avkom i

naturen har lavere overlevelse og reproduksjonssuksess enn villaks (Fleming et al., 2000; Skaala et al., 2012; Wacker et al., 2021). Temporale genetiske studier har vist genetiske endringer i atlantisk laksebestander over tid knyttet til innkryssing fra rømt oppdrettslaks (Glover et al., 2012; Skaala et al., 2006). Innkryssing fører også til endringer i viktige livshistoriske karakteristika (Besnier et al., 2022; Bolstad et al., 2017). Selv om langtidseffektene av innkryssing kan bli dempet av naturlig seleksjon (Harvey et al., 2026), er det viktig å bevare genetisk variasjon, for i et klima i endring vil villaksbestander måtte kunne tilpasse seg de forventede endringene i miljøet. Klimaendringer vil ikke endre den nåværende genetiske status hos villaksen ettersom dagens innkrysningsnivå er et estimat på innkryssing som alt har skjedd.

Redusert robusthet av villaksbestandene

Gitt at sannsynligheten for « Svekket bestandsstatus hos villlaksen » forventes å øke under de forventede klimaendringene, forventes sannsynligheten for « Redusert robusthet av villaksbestandene » å øke under de forventede klimaendringene. Kunnskapstyrken vurderes som moderat, ettersom omfanget av klimaendringenes påvirkning på villaksbestander fortsatt er noe usikkert.

Ytterligere genetisk endring hos villaksen som følge av innkryssing av rømt oppdrettslaks

De flest rømmingsepisoder har tidligere vært arbeidsoperasjons-relatert, i hovedsak knyttet til avlusing. Det forventes at klimaendringer vil øke sannsynligheten for rømming på grunn av mer håndtering av fisk knyttet til avlusing, samtidig som det er forventet flere tilfeller av ekstremvær. Dette vil kunne føre til en økning i andel rømt oppdrettslaks på gyteplassene. Klimaendringer kan påvirke alle livsstadier av villaks, med økte vanntemperaturer, endring i vannføring og endringer i havøkosystemene. Det er derfor forventet at ville bestander vil bli ytterligere svekket på grunn av klimaendringer, selv om påvirkningen forventes å variere mellom ulike geografiske områder. Dette vil redusere bestandenes robusthet mot ny innkryssing. Samlet sett vurderer vi at de skisserte klimaendringene fører til økt risiko for «ytterligere genetisk endring hos villaksen som følge av innkryssing av rømt oppdrettslaks». Kunnskapsgrunnlaget vurderes som moderat.

4.5 Konklusjon

En samlet vurdering av de tre laksefiskartene viser tydelige forskjeller i hvordan de forventes å reagere på klimaendringer. Røyepopulasjonene fremstår som de mest sårbare, ettersom arten er sterkt tilpasset kalde vannmasser og allerede i dag har en begrenset utbredelse. Klimaendringer alene forventes derfor å gi en markant forverring i røyas tilstand. For ørret er bildet noe mer sammensatt, og utfallet av klimaendringene er mer usikkert da det mangler kunnskap om samspillet mellom de konkurrerende laksefiskartene. Også for villaks er mekanismen bak en klimaeffekt mindre entydig. Laksens marine beiteområder ligger i åpne havområder der temperaturøkningen foreløpig er mer moderat, og hvor responsen på klimaendringer varierer geografisk.

Oppdrett påvirker alle tre artene laksefisk, og den største dokumenterte påvirkningsfaktorene er smitte av lakselus. Smitte av andre patogener kan være problematisk for vill laksefisk, samtidig som det er utfordrende å dokumentere. For laks er det også godt dokumentert at rømt oppdrettslaks har krysset seg med villaks, noe som kan endre egenskapene til villaksen.

I vår vurdering vil klimaendringer øke sannsynligheten for negativ påvirkning fra oppdrettsaktivitet på vill laksefisk. For lakselus skyldes dette hovedsakelig at høyere temperaturer gir raskere utvikling og høyere lusesmittepress. For andre patogener påvirkes smitterisikoen fra oppdrett til villfisk først og fremst av at økende temperaturer kan føre til raskere sykdomsutvikling og et mer alvorlig sykdomsbilde hos fisk i oppdrett. Samtidig vil ikke de forventede klimaendringene nødvendigvis gi en enkel, ensrettet økning i sykdomsforekomst for alle agens. En økning i avlusning (operasjonelle operasjoner) kan øke hyppigheten av rømningshendelser, noe som øker sannsynligheten for mer oppdrettslaks på gyteplassene med påfølgende innkryssing og ytterligere

genetisk påvirkning av ville bestander. En økning i ekstremvær kan også øke risikoen for flere rømmingshendelser.

I tillegg kommer den samlede effekten av klimaendringer på laksefisk generelt. Mange bestander av atlanterhavslaks er evolusjonært tilpasset de spesifikke forholdene i sine hjemvassdrag, og til dels også de marine beiteområdene og migrasjonsrutene de benytter. Når disse forholdene endres raskt, øker sannsynligheten for at genetiske og økologiske tilpasninger svekkes. Dette kan gi redusert overlevelse, lavere produktivitet og større sårbarhet for andre påvirkninger. En robust populasjon er det viktigste grunnlaget for å tåle både naturlige og menneskeskapte stressfaktorer. Når klimaendringene svekker denne robustheten, endres også vurderingen av risiko fra oppdrettsaktivitet. Ikke bare kan påvirkningene fra oppdrett forverres, men klimaendringene endrer også rammene for hva som er bærekraftig og hva naturen faktisk tåler.

5 - Utslipp av næringssalter, organiske partikler, miljøgifter og legemidler i et klimaperspektiv

5.1 Introduksjon

Utslipp fra åpne merder i sjø kommer i form av løste næringssalter, organiske partikler, fremmedstoff og legemidler. Når laksefisk spiser vil det som følge av metabolismen slippes ut løste næringssalter, hovedsakelig via gjellene, men også en mindre andel i form av urea. Utslipp av organiske partikler vil være direkte til miljøet i form av avføring fra fisken (fekalier) og fôr som ikke er blitt spist (spillfôr).

Fiskefôr kan inneholde miljøgifter som kommer fra fôringrediensene og disse kan tilføres miljøet både gjennom spillfôr og gjennom fekalier. Andre stoff tilsatt fôret i små mengder er blant annet kobber og sink som er nødvendige for at fisken skal ha god tilvekst og helse, men er skadelige for miljøet ved for høye konsentrasjoner. Regelverket som regulerer tilsetningen av blant annet kobber og sink til fiskefôr krever at kun godkjente tilsetningsstoffer brukes. Disse må være vurdert av myndigheter som European Food Safety Authority (EFSA) med hensyn til folkehelse, dyrehelse og miljø. Det pågår nå et stort samfunnsoppdrag på bærekraftig fôr som har som formål at alt fôr til oppdrettsfisk og husdyr skal komme fra bærekraftige kilder innen 2034 og dermed bidra til redusert klimagassutslipp i matsystemene. Man vil anta at fôrsammensetningen vil kunne endre seg i fremtiden gitt dette oppdraget og også da partikulært organisk utslipp fra fekalier og fôrspill. Akvakultur i åpne merder krever tiltak for å begrense groe på nøtene slik at fisk i merden får tilstrekkelig vanngjennomstrømming og oksygentilførsel. Antigromidler blir brukt for å hindre at ulike organismer fester seg til og gror på nøtene. Utslipp av legemidler omfatter behandling mot bakterier samt midler mot innvollsorm og lakselus. I tillegg kommer anestesi- og desinfeksjonsmidler. Legemidler gis enten oppløst i vann til badebehandling av fisk eller via fôret.

Vurderingen av forventede klimaendringers påvirkning på risikobilder for utslipp av næringssalter, partikulært organisk materiale, miljøgifter og legemidler følger strukturen for risikovurdering i «Risikovurdering Norsk Fiskeoppdrett 2025» der risikokilder, hendelser og konsekvenser struktureres og visualiseres gjennom Bayesianske nettverk, kalt risikokart (se Fig. 5.1). I denne gjennomgangen vurderer vi hvordan dette bildet kan forventes å endres med endrede klimatiske forhold. Dette gjør vi gjennom å se på effekten av forventede temperaturendringer og ekstremhendelser på sannsynlighet og kunnskapsgrunnlag for risikokilder, hendelser og konsekvenser. Vurdering av klimarespons på effekter av utslipp fra akvakultur er basert på dagens teknologi, produksjonsnivå og fôrsammensetning.

5.2 Næringssalter, planteplankton og makroalger

5.2.1 Introduksjon

Klimaendringer påvirker næringssalter, planteplankton og makroalger direkte gjennom flere prosesser, deriblant vindindusert blanding, utveksling av varme og næringsstoffer med naboregioner, ferskvannsavrenning, sesongmessig lysvariasjon, og dannelse og smelting av is. Oppvarming av overflatevann isolert sett vil føre til sterkere lagdeling av vannmassene i fjordene slik at det hindrer næringsrikt vann å komme opp i eufotisk sone. Dette kan påvirke planteplanktonproduksjonen negativt, og en studie av slike mønster i verdenshavene har vist at det på lavere breddegrader var en tydelig nedgang i planteplanktonproduksjonen, mens prosessene var mer uforutsigbare på høyere breddegrader (Feng et al., 2015). Det er flere årsaker til dette. Økt issmelting kan gi større areal med åpen sjø noe som vil føre til økt planteplanktonproduksjon (Myksvoll et al., 2023; Sandø et al., 2021). Økt stormaktivitet kan føre til mer miksing av vannsøylen slik at mer næringssalter blir tilgjengelig på

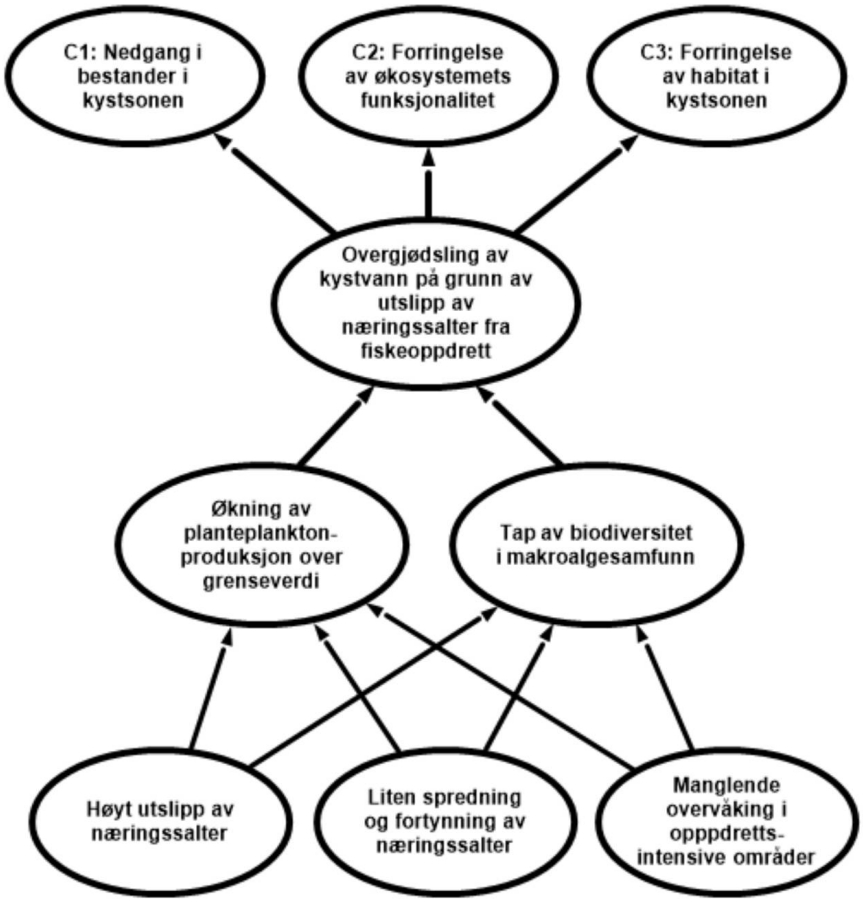
kysten. Høyere temperaturer kan føre til økt planteplanktonproduksjon dersom det er nok næringssalt tilgjengelig. Økt nedbøraktivitet kan føre til mer avrenning fra land som igjen fører til mørkere vann, med det resultat at tilgjengelig lys for primærproduksjon blir mindre noe som vil legge en demper på planteplanktonproduksjonen (Hjøllo et al., 2025).

Samtidig vil økt nedbør og avrenning føre med seg næringssalter til overflatelaget og stimulere planteplanktonproduksjon. Dersom akvakulturaktiviteten er omtrent uendret fra dagens nivå, kan man ikke forventet at endringer i klimatiske faktorer vil endre påvirkningsgraden fra akvakultursektoren når det gjelder næringssaltutslipp. Endringer i klimatiske forhold, eks økt transport av næringssalter fra land, vil først og fremst påvirke den samlede belastningen til et kyst-fjordområde. Dette vil påvirke resipientens bæreevne for næringssalter og vil kunne medfører tiltak for å redusere den samlede påvirkningen.

Varmere klima kan også påvirke makroalgevegetasjonen. Varme somre og vedvarende høye temperaturer utover høsten fører til at varmekjære arter som normalt er på kanten av sitt utbredelsesområde blir mer vanlige (Husa et al., 2008; Sjøtun et al., 2015). Marine hetebølger kan ha fatale konsekvenser for de norske tareskogsplantene i Sør-Norge, da de fleste av disse artene ikke tåler høye temperaturer over flere uker (Filbee-Dexter et al., 2020). Med økt frekvens av marine hetebølger forventes det at langlivede arter som danner tredimensjonale habitat, vil bli erstattet med små ettårige arter (Straub et al., 2019). Varmere klima kan også ha subletale effekter på tareskogstrukturen, da høyere temperaturer fører til mindre planter (Wernberg et al., 2025). Frigstad et al. (2023) fant at økt avrenning fra elver og formørking av vann reduserte dybdeutbredelsen til en rekke makroalgearter i Skagerrak i perioden 1990 til 2016, selv om næringssaltverdiene var nedadgående i perioden. I Nord- Norge kan økte temperaturer, kombinert med høyere forekomst av predatorer som taskekrabbe og kongekrabbe, føre til mindre kråkebollenedbeiting av tareskogen (Christie et al., 2019). Havforsuring kan også påvirke bentiske kalkalgers evne til å danne kalk. I nordlige deler av landet har vi store områder med ruglbunn som består av slike kalkalger. Disse er viktige habitat for andre arter og kan påvirkes negativt av slike klimaeffekter.

5.2.2 Vurdering av klimaendringer på næringssalter, planteplankton og makroalger

De forventede effektene av klimaendringer på risikoen for overgjødsling av kystvann på grunn av utslipp av næringssalter fra fiskeoppdrett følger samme strukturen som i "Risikorapport norsk fiskeoppdrett 2026" (Grefsrud et al., 2026), Fig. 5.1. Her diskuterer vi hvordan hver hendelse forventes å bli påvirket av klimaendringer og hvordan dette vil påvirke risikoen for overgjødsling. Når man legger dagens produksjonsnivå til grunn, vil utslippene av løste næringssalter fra fiskeoppdrett være uendret i et endret klima, men den samlede belastningen kan bli større fordi man forventer større utslipp av løste næringssalter fra land. Sannsynligheten for liten spredning og fortynning vil også være uendret da man ikke forventer vesentlige endringer i strømmønster i overflatelaget. Sannsynligheten for manglende overvåkning vil heller ikke påvirkes av klimaendringer.



Figur 5.1. Skjematisk fremstilling (risikokart) av risiko for "Overgjødsling av kystvann på grunn av utslipp av næringssalter fra fiskeoppdrett".

Økning av planteplanktonproduksjonen over grenseverdi

Det er vanskelig å predikere hvordan økte temperaturer, formørkning av vannet, økt tilførsel av næringssalter fra land og økt lagdeling vil samspille og hvorvidt det vil bidra til en lavere eller høyere netto planteplanktonproduksjon (NPP). Simuleringer av hvordan effekten fra utslipp fra akvakultur, økt temperatur og formørkning av vannet i Hardangerfjorden vil påvirke NPP, viste at selv om man fikk noe økt produksjon ved høyere temperatur, ga økt akvakulturutslipp en sterkere produksjonsøkning. Endring i lysforholdene på grunn av økt avrenning dempet denne effekten, slik at det samlet sett ikke ble påvist endring i fjordens miljøstatus (Hjøllo et al., 2025).

Med dagens produksjonsnivå, og næringssaltutslipp, vurderes det derfor at et endret klima ikke vil øke sannsynligheten for økning av planteplanktonproduksjon over grenseverdi, men med svak kunnskapsstyrke på grunn av mange ulike faktorer som endring i lagdeling, økt ferskvannsutslipp og formørking av kystvann, som kan samspille med ukjent resultat. I vurdering av eutrofieringsgrad vil det være avgjørende å se på en samlet næringssaltbelastning, da klimaendring vil medføre endret avrenning og dermed tilførsel av næringssalter fra land. En slik samlet belastning vil påvirke en resipients bæreevne for næringssaltomsetning og vil kunne ha betydning for fremtidig akvakultur aktivitet i fjordområdene.

Tap av biodiversitet i makroalgesamfunn

Selv om klimaendring vil kunne ha en betydelig direkte effekt på makroalgesamfunn, vil trolig effekten av utslipp

av løste næringssalter fra oppdrett være liten på en regional skala. Imidlertid er makroalger sårbare når de blir utsatt for flere stressfaktorer, slik at en kombinasjon av økte temperaturer, formørkning av vann, økt ferskvannsavrenning, havforsuring og endret samlet tilførsler av næringssalt fra oppdrett og økt avrenning kunne gi negativ effekt på biodiversiteten i makroalgesamfunn. Artssammensetning og dybdeutbredelse av makroalger inngår også som overvåkningsindikatorer i vannforskriften. Ved klimaendringer kan det derfor bli vanskelig å skille klimaeffekter fra eutrofieffekter i makroalgesamfunnene, noe som vil gjøre overvåkningsdata vanskeligere å tolke.

På grunn av effekten av flere samtidige stressfaktorer, slik som økte temperaturer og økt konkurranse med varmekjære arter, større ferskvannstilrenning og formørkning av kystvann, vurderes sannsynligheten for tap av biodiversitet i makroalgesamfunn ved klimaendringer å kunne øke noe sett i lys av endringer i den samlede belastningen. Kunnskapsstyrken vurderes som moderat, da det er usikkert hvordan effekten av flere stressfaktorer vil bli på makroalgesamfunn

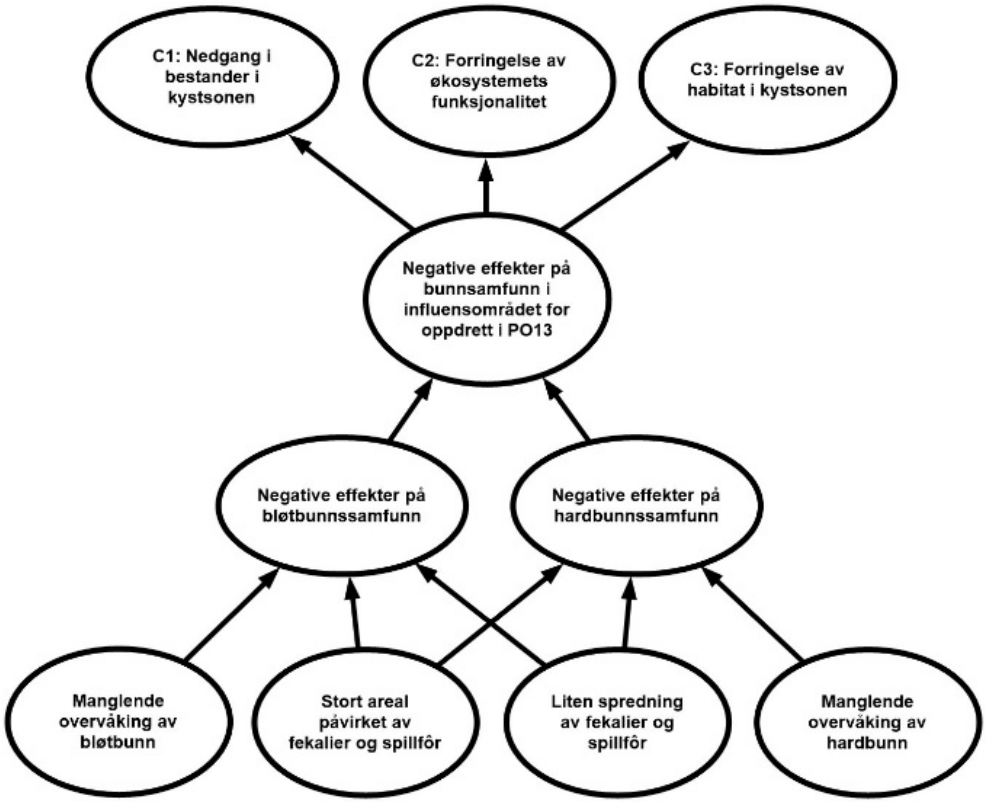
Overgjødsling av kystvann på grunn av utslipp av løste næringssalter fra fiskeoppdrett

Med utgangspunkt i dagens produksjonsnivå er det ingen direkte effekter av klimaendringer som vil gi vesentlige endringer i næringssaltutslipp fra akvakulturaktivitet. Man vurderer dette utslippet som mer eller mindre stabilt i mengde, men enkelte effekter av klimaendringer vil kunne medføre endring i dynamikk og fordeling. Med endringer i nedbørsmengde og intensitet er det sannsynlig at man får økt avrenning og tilførsel av næringssalter fra land. Dette vil føre til at den samlede næringssaltbelastningen for et kyst- fjordområde vil kunne øke sannsynligheten for overgjødsling, med påfølgende endringer i planteplanktonproduksjonen. Det er manglende kunnskap om virkningene av prosesser som økte temperaturer, økt ferskvannsavrenning, formørkning av kystvann og vertikal stabilitet på overgjødsling, og kunnskapsstyrken vurderes som moderat til svak.

5.3 Partikulært organisk materiale

5.3.1 Introduksjon

De forventede effektene av klimaendringer på risikoen for utslipp av partikulært organisk materiale følger samme strukturen som i "Risikorapport norsk fiskeoppdrett 2026”, Fig. 5.2. Her diskuterer vi hvordan hver risikokilde og hendelse forventes å bli påvirket av klimaendringer og hvordan dette vil gi utslag på risikoen for negative effekter på bunnsamfunn i influensområdet for oppdrett fra utslipp av partikulært organisk materiale.



Figur 5.2: Skjematisk fremstilling (risikokart) av risiko for "negative effekter på bunnsamfunn i influensområdet for oppdrett fra utslipp av partikulært organisk materiale"

5.3.2 Vurdering av klimaendringer på partikulært organisk materiale

Manglende overvåking av bløtbunn

Sannsynligheten for manglende overvåking av bløtbunn er vurdert som lav på grunn av miljøovervåking på bløtbunn basert på «NS 9410:2016 Miljøovervåking av bunnpåvirkning fra marine akvakulturanlegg». Vi antar at sannsynligheten ikke vil endre seg som følge av klimaendringene og vil fortsatt være lav. Miljøovervåking av bløtbunn er godt dokumentert og kunnskapsstyrken vurderes derfor som sterk. Det bør likevel bemerkes at klimaendringene kan føre til redusert utskifting av bunnvannet, særlig i fjorder med grunne terskler, noe som kan føre til lavere oksygennivå i bunnvannet. Dette kan igjen føre til at kapasiteten til å bryte ned organisk materiale under oppdrettsanlegg reduseres, noe som kan medføre behov for hyppigere miljøovervåking.

Stort areal påvirket av fekalier og spillfôr.

Klimaendringer kan påvirke mengden av partikulært organisk materiale som slippes ut fra merdene gjennom temperaturavhengige fysiologiske prosesser hos laks som påvirker fôrinntak og vekst (Collins et al., 2020; Reid et al., 2019). Fôrinntak og vekst hos post-smolt laks er optimal ved bestemte temperaturintervaller, med maksimum ved 10,5 °C for fisk på ca. 1,2 kg (Fraser et al., 2025) og ved 12 °C for post-smolt laks på 200 g (Lai et al., 2025). Ved høyere temperaturer reduseres både fôrinntak og vekst som følge av fysiologisk stress og endret energibalanse. Samtidig akselereres kjønnmodning hos hannfisk, noe som igjen er assosiert med redusert fôrinntak (Handeland et al., 2008; Lai et al., 2025). I Nord-Norge (snittemperaturen på 10 m observert på kyststasjonen 7,5 – 8,5 °C) forventes økt fôropptak ved temperaturstigning, mens i Sør-Norge vil fôropptaket reduseres når temperaturen overstiger optimalnivået for laksevekst. Om sommeren er det nå vanlig at sjøtempeturen (10 m) i Hardangerfjorden går opp til 18 °C og kan komme til å skje oftere under klimascenarier og hyppigere sommerhetebølger særlig i sør. Økt lagdeling i vannsøylen kan redusere synkehastigheten til

partikulært organisk materiale (Condie & Bormans, 1997) men er i hovedsak kun relevant for indre fjorder. Lengre oppholdstid i vannsøylen kan dermed øke spredningen av særlig de minste fraksjonene av partikulært organisk materiale fra oppdrettsanlegg, slik det også er observert for mudringsplumer (Seo et al., 2018). Selv om økt lagdeling i vannsøylen kan øke potensialet for spredning av partikler i fjorden, så må lagdelingen være sterk for å ha betydelig innvirkning på arealet som påvirkes av fekalier og spillfôr. Men samtidig vil økt hyppighet og intensitet av ekstremvær også føre til økt omrøring i vannsøylen.

Den samlede effekten av endringer i tilførsel, økt lagdeling og omrøring er kompleks og vil variere betydelig med lokasjon langs norskekysten. Med dagens produksjonsnivå og forventede klimascenarier vurderer vi at sannsynligheten for at «Stort areal påvirket av fekalier og spillfôr» ikke vil endre seg. Vurderingen er basert på svak kunnskapsstyrke på grunn av manglende innsikt i hvordan faktorene nevnt ovenfor kan samspille.

Liten spredning av fekalier og spillfôr.

På grunn av den redusert tetthet av kystvannet, inntreffer ikke utskiftingsepisodene like ofte som før og dette kan innebære en økning i antall fjordbassenger med moderat til sjelden vannutskifting (Johnsen et al., 2024). Sjeldnere vannutskiftning antas å redusere spredningspotensialet og sannsynlighet for liten spredning av fekalier og spillfôr øker, særlig for produksjonsområder med terskelfjorder. Dette innebærer at mindre områder kan være eksponerte av partikulært organisk materialer, men at bassenger i terskel fjorder med lang oppholdstid for bunnvann er særlig sårbare for lavt oksygeninnhold. Risikoen øker spesielt i fjorder med høy tilførsler av organisk materiale, noe som i verste fall kan føre til hypoksi (Nordberg et al., 2017). Økt dominans av opportunistiske arter er knyttet til redusert oksygeninnhold og høy organisk belastning, særlig i indre terskelfjorder (Johansen et al., 2018). Dominans av opportunistiske arter kan på sikt føre til bunnsamfunn dominert av mikroorganismer og utvikling av hypoksi (Diaz & Rosenberg, 1995). Med endring i utskiftningsfrekvens på grunn av klimaendringer er det fare for at områder som i dag er uproblematiske vil få utfordringer i fremtiden, selv om produksjonen holdes på dagens nivå. Dette vil ha betydning for fremtidig aktivitet og plassering av nye anlegg. Modellert endring i vannutskifting i fjordbassenger bygger på observasjoner i noen fjorder. Siden det mangler observasjon fra alle fjordsystemer, vurderes kunnskapsstyrken som moderat.

Manglende overvåking av hardbunn

Foreløpig har vi ikke overvåkingssystem for hardbunn slik det er for bløtbunn (Norsk Standard NS9410.2016) og da mindre kunnskap om tilstanden. Høyere andelen av lokaliteter over hardbunn vil gi dårligere overvåking langs kysten. Redusert vannutskifting og lavere oksygennivå i bunnvann i terskelfjorder vil kunne gi dårligere miljøtilstand og dermed redusere bruken av indre fjordområder med bløtbunn for eksisterende og planlagte oppdrettsanlegg. Dette kan føre til at flere lokaliteter flyttes til midtre og ytre fjordområder, hvor hardbunn er mer vanlig. Samtidig kan mer ekstremvær gjøre det mer krevende å etablere og drifte anlegg med dagens teknologi i ytre kystområder, som ofte er dominert av hardbunn. Disse endringene har potensial til både å øke og redusere antallet av hardbunnslokaliteter. Derfor med dagens teknologi og forventede klimascenarier vurderer vi at sannsynligheten for «Manglende overvåking av hardbunn» ikke vil endre seg. Vurderingen er basert på svak kunnskapsstyrke på grunn av manglende innsikt i hvordan faktorene nevnt ovenfor kan samspille.

Negative effekter på bløtbunnsamfunn

Oksygennivået i bunnvann forventes å bli redusert som følge av klimaendringer, særlig i fjorder med grunne terskler (< 100 m) på grunn av redusert utskifting av bunnvannet samt endringer i vannet oksygenmetning pga. temperaturøkninger. Høy omsetning av organisk materiale kan ytterligere redusere oksygennivået og økt avrenning fra omkringliggende landområder vil føre til økt tilførsel av organisk materiale til kystområder. Ved lavere oksygen og økt sedimentasjon vil bunnsamfunnet endres og i større grad bli dominert av

mikroorganismer (Keeley et al., 2013), slik at evnen til å bryte ned organisk materiale reduseres (Holmer, 1999). Redusert oksygentilgang i bløtbunnsedimenter kan svekke bentiske samfunns nedbrytning av organisk materiale og dermed bidra til økt sannsynlighet for negative effekter på bløtbunnsamfunn. Dette kan føre til at lokaliteter som brakklegges kan bruke lengre tid på å restituere, særlig i terskelfjorder med begrenset vannutskifting og bløtbunn.

Til tross for vurdering av om at sannsynlighet for «manglende overvåking av bløttbunn» og «Stort areal påvirket av fekalier og spillfôr» ikke vil endre seg samlet vurderer vi at sannsynligheten for «Negative effekter på bløtbunnsamsunn» vil øke under de forventede klimaendringene. Dette skyldes i hovedsak redusert oksygennivå i bunnvannet og endret vannutskiftning som øker sannsynligheten for liten spredning av fekalier og spillfôr. Kunnskapsstyrken vurderes som sterk fordi endringer i nedbrytning forårsaket av redusert oksygennivå i bunnvannet er godt dokumentert.

Negative effekter på hardbunnssamfunn

Sannsynlighet for «manglende overvåking av hardbunn» og «stort areal påvirket av fekalier og spillfôr» vil ikke endre seg, men sannsynlighet for «liten spredning av fekalier og spillfôr» vil øke under de forventede klimaendringene. Hardbunnsamfunn vil også utsettes for reduserte oksygennivåer, noe som begrenser nedbrytningen av organisk material. I tillegg, bunndyr som er avhengige av kalkdannelse kan være spesielt sårbare for havforsuring som er forventet å øke under klimaendringene, eksempelvis kaldtvannskoraller (Hennige et al., 2015) ruglbunn (Martin & Hall-Spencer, 2017) og krepsdyr. Øyekorall og dødt korallmateriale er viktig habitat for bunnsamfunn (Hennige et al., 2015; Wisshak et al., 2012). Samtidig kan avfall fra akvakultur påvirke korallveksten (Kutti et al., 2022), og økt havforsuring kan gjøre korallene nært til oppdrettsanlegg mer sårbare for slike påvirkninger. Korallrev og ruglbunn, som er spesielt utsatt for havforsuring, forekommer på hard- og blandingsbunn

Klimaendringer vurderes dermed å øke sannsynligheten for negative effekter på hardbunnssamfunn i områder med disse habitatene. Grunnet at kunnskapen om klimaeffekter er i stor grad begrenset til noen få hardbunnsarter, særlig koraller og svamp, vurderer vi kunnskapsstyrken som moderat.

Negative effekter på bunnsamfunn i influensområdet

Klimaendringer fører til økt sjøtemperatur, redusert oksygennivå i bunnvann, redusert vannutskifting i enkelte fjorder og økt styrke og hyppighet av stormer. Til tross for at disse endringene i hovedsak kun gir økt sannsynlighet for liten spredning av partikulært organisk materiale, og ingen endring i sannsynligheten for manglende overvåking eller stort areal påvirket av fekalier og spillfôr, øker sannsynligheten for negative effekter på bløt- og hardbunnssamfunn. Dette skyldes i all hovedsak redusert nedbrytning og økt sårbarhet hos enkelte hardbunnsarter.

Samlet vurderer vi at sannsynligheten for «Negative effekter på bunnsamsfunn i influensområdet» vil øke under det forventede klimascenariet. Kunnskapsstyrken vurderes som moderat til tross for at endringer i nedbrytningssammensetning ved redusert oksygennivå i bunnvannet er godt dokumentert på bløtbunn så er kunnskapen om hardbunn begrenset til noen få arter.

5.4 Miljøgifter

5.4.1 Introduksjon

Klimaendringer kan påvirke forekomst og effekter av miljøgifter på flere måter gjennom fysiske, kjemiske og biologiske endringer i miljøet. Slike endringer omfatter temperaturøkning, økt avrenning fra land, endringer i pH, redusert oksygennivå, endringer i saltholdighet og forekomst av ekstremhendelser som stormer og marine

hetebølger.

Høyere temperatur kan gi økte reaksjonshastigheter og økt mikrobiell aktivitet eller oppblomstring som både kan øke nedbrytingen av miljøgifter og øke danningen av mer giftige metabolitter. Økt bakteriell oppblomstring kombinert med forhøyete konsentrasjoner av tungmetall (f.eks. Cu, Zn, Cd eller Hg) eller andre biocider/antigroemiddel kan indusere seleksjon for antibiotikaresistens i bakterier, som for eksempel *Vibrio* spp. Det er godt dokumentert at økning i sjøtemperatur fører til høyere mengde patogene *Vibrio* bakterier som også er mer virulente (Baker-Austin et al., 2018).

Økt avrenning fra land på grunn av økt nedbør kan tilføre mer miljøgifter til kystsonen. Økt nedbør kan også gi økt utfelling av miljøgifter som kan gi høyere bakgrunnsnivå av miljøgifter (Noyes et al., 2009).

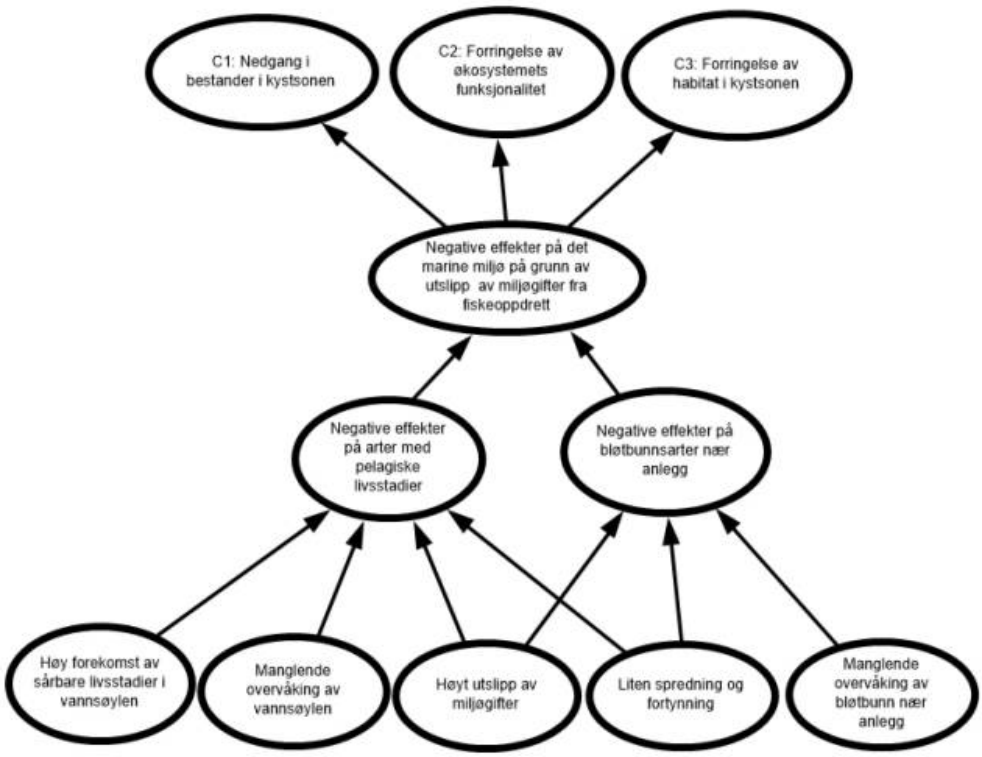
Endringer i pH, oksygen og redoksforhold i sedimentene kan frigjøre metall (f. eks. Fe, Mn og As) og endre hvordan stoff blir omdannet, f. eks. påvirke metylering av kvikksølv (Landrigan et al., 2020). Forsuring eller oksidering i marine miljø kan påvirke løselighet og kompleksdanning for mange metall og organiske forbindelser og på den måten påvirke biotilgjengeligheten.

Sterke stormer kan øke omrøring og sedimenttransport i grunne områder og spredning av forurenset materiale. De kan også føre til økt slitasje og spredning av biocider fra antigroemiddel på merdene. Marine hetebølger kan gjøre artene mer sårbare for påvirkning fra miljøgifter.

Det er fortsatt behov for økt kunnskap og forståelse av hvordan pågående og fremtidige klimaendringer påvirker nivåer og effekter av miljøgifter i marine økosystem (Frantzen et al., 2021).

5.4.2 Vurdering av klimaendringer på miljøgifter

Vi vurderer hvordan ulike risikokilder, hendelser og konsekvenser som vist i figur 5.3 kan påvirkes av et endret klima og føre til en endret vurdering av om dette kan føre til økte negative effekter på det marine miljø på grunn av utslipp av miljøgifter fra fiskeoppdrett.



Figur 5.3. Visualisering av risiko for negative effekter på det marine miljø på grunn av utslipp av miljøgifter fra norsk fiskeoppdrett.

Høy forekomst av sårbare livsstadier i vannsøylen

Klimaendringer kan påvirke våroppblomstring og artssammensetning. Dette kan igjen påvirke forekomst av sårbare livsstadier i vannsøylen. Vi trenger mer kunnskap for å forstå hvordan dette kan endre seg ved et varmere klima.

Manglende overvåking av vannsøylen eller av bløtbunn nær anlegg

Det at klimaendringene gjør at flere risikofaktorer kan endre seg gjør at vi trenger økt overvåking for å måle og forstå endringene. Blant annet bør man vurdere å overvåke pelagiske- og bentiske mikroorganismer, spesielt med tanke på utvikling av antibiotikaresistens.

Høyt utslipp av miljøgifter

Utslipp av miljøgifter fra antigroemiddel

Økt temperatur kan føre til økt tilvekst av ulike organismer som gror på oppdrettsnøtene, f. eks alger, sjøpung, blåskjell eller nye groeorganismer. Dette kan føre til at oppdretterne bruker større mengder kjemiske midler som dreper organismene (biocider) som antigroemiddel på merdene. Dette kan igjen føre til at økte mengder biocider lekker ut til vannsøylen og sedimenterer til bunnen enten som passiv utlekking eller som pulser med høyere konsentrasjoner av biocider på grunn av spyling eller mekanisk børsting av nøtene. Økt hyppighet av stormer vil også kunne øke slitasje på nøtene og føre til økte utslipp.

Utslipp av miljøgifter fra fôret

Økte temperaturer kan også føre til endring i metabolisme og opptak/utskilling av fôringredienser. Dette kan påvirke hvor stor andel av miljøgiftene i fôret som går gjennom fisken og ut til miljøet som fekalier. Det at

klimaendringer også kan føre til økt avrenning og utfelling gjennom økt nedbør kan føre til høyere bakgrunnsnivå og større sannsynlighet for samvirkende effekter og redusert tålegrense for sårbare stadier av ulike arter.

Liten spredning og fortynning

Det at høyere temperaturer i kyststrømmen kan redusere utskifting av bunnvann i terskelfjorder kan føre til dårligere vannutskifting og redusert spredning av miljøgifter i en resipient som kan øke risikoen for at konsentrasjonen av miljøgifter kommer over terskelverdier fro effekt.

Negative effekter på det marine miljø på grunn av utslipp av miljøgifter fra fiskeoppdrett

Siden et varmere klima kan føre til høyere forekomst av sårbare livsstadier i vannsøylen, økt sannsynlighet for manglende overvåking, økt sannsynlighet for økte utslipp av miljøgifter og økt sannsynlighet for liten spredning og fortynning vurderer vi at det er økt sannsynlighet for negative effekter på arter med pelagiske livsstadier og økt sannsynlighet for negative effekter på bløtbunnsarter nært anlegg. Dette gjør at det er større sannsynlighet for økt sannsynlighet for negative effekter på det marine miljø på grunn av utslipp av miljøgifter fra fiskeoppdrett gitt et varmere klima. Kunnskapsstyrken vurderes som svak for høyere forekomst av sårbare livsstadier i vannsøylen og som moderat for økt sannsynlighet for økte utslipp av miljøgifter. Samlet sett vurdere kunnskapsstyrken som moderat for negative effekter på det marine miljø på grunn av utslipp av miljøgifter fra fiskeoppdrett gitt et varmere klima.

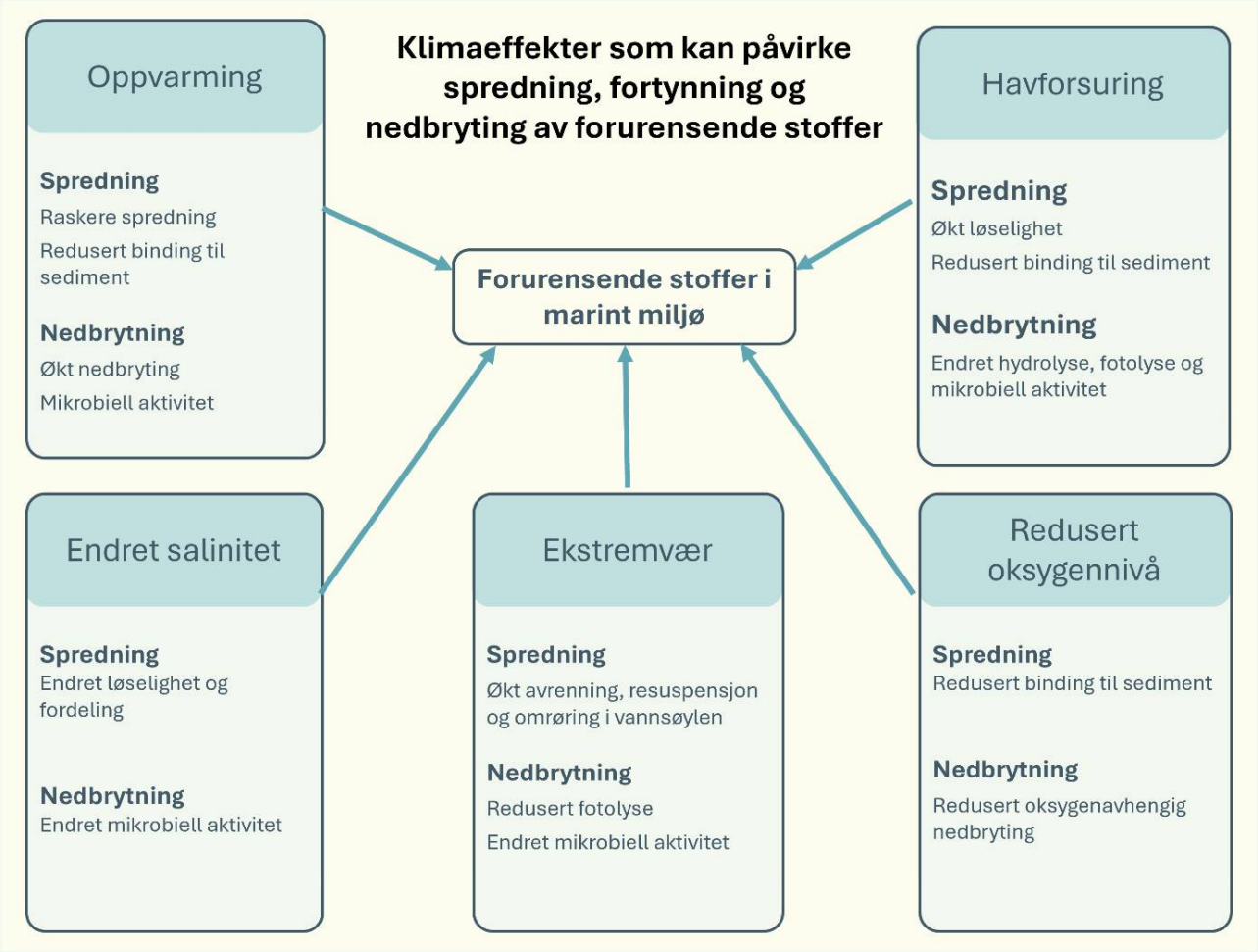
5.5 Legemidler

5.5.1 Introduksjon

Samspill mellom klima og forurensende stoffer forekommer ofte i naturlige miljøer, og det er forventet at både omfanget og alvorlighetsgraden av slike interaksjoner vil øke som følge av klimaendringer (Bednarska et al., 2013; Heugens et al., 2001). Studier har vist at klimaendringer som økt temperatur, redusert oksygennivå, havforsuring og endring i saltholdighet kan påvirke både konsentrasjon i miljøet og arters følsomhet (Holmstrup et al., 2010; Laskowski et al., 2010). Dette kan medføre at nivåer av kjemiske stoffer som tidligere ble ansett å ikke gi negative effekter på marint miljø, i fremtiden kan bli det, og at organismer kan få redusert evne til å håndtere slik påvirkning.

Klimaendringer kan endre konsentrasjonen i miljøet gjennom økt utslipp, redusert spredning og fortynning og redusert nedbryting. En generell oversikt over hvordan klimaendringer kan påvirke spredning, fortynning og nedbryting er vist i fig. 5.4. Dette kan medføre at forurensende stoffer kan nå nye områder, økt tilstedeværelse i miljøet og utgjøre en større økologisk risiko. Det er viktig å merke seg at effektene kan variere mellom ulike kjemikalier, og at figuren ikke spesifikt gjelder kjemikalier brukt i norsk fiskeoppdrett. Legemidler brukes både via fôr og som badebehandling, og det vil derfor være forskjeller mellom disse to gruppene, samt mellom ulike legemidler.

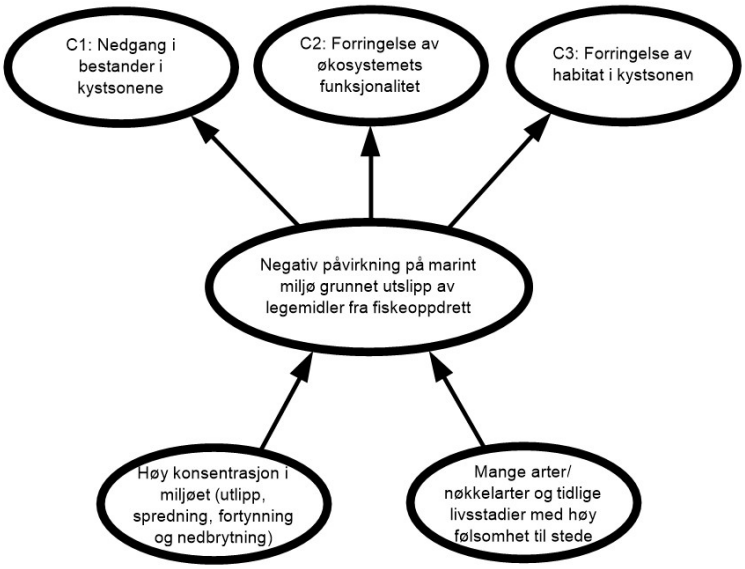
Klimaendringer kan medføre øking av arters følsomhet ved å gjøre kjemikaliene mer mobile eller reaktive, redusere organismenes energi til avgiftning, skade viktige fysiologiske systemer som gjeller, stoffskifte og syrebasebalanse (Noyes et al., 2009). Disse effektene kan forsterkes ytterligere, ettersom kjemikaliene kan påføre større skade når artene allerede befinner seg nær sine fysiologiske grenser som følge av temperaturøkning eller andre klimaeffekter (Noyes et al., 2009).



Figur 5.4. Illustrasjon av klimaendringer som kan påvirke tilstedeværelse av forurensende stoffer i miljøet.

5.5.2 Vurdering av klimaendringer på legemidler

Vi vurderer hvordan risikokildene i Fig. 5.5 forventes å bli påvirket av klimaendringer og hvordan dette vil gi utslag på risikoen for negative effekter på marint miljø grunnet utslipp av legemidler fra fiskeoppdrett.



Figur 5.5. Visualisering av risiko for negativ påvirkning på marint miljø grunnet utslipp av legemidler fra fiskeoppdrett

Høy konsentrasjon i miljøet

Økt temperatur kan medføre økt forekomst av lakselus som igjen kan medføre behov for flere og hyppigere avlusningsbehandlinger som vil medføre økt utslipp av avlusningsmidler. Hvis det på grunn av klimaendringer innføres nye parasitter (utvending og innvending) vil dette også kunne medføre økt forbruk av legemidler. Tilsvarende kan også nye bakteriesykdommer eller hyppigere utbrudd medføre økt bruk av antibakterielle midler.

Etter utslipp vil konsentrasjonen av legemidlene bli redusert gjennom spredning, fortynning og nedbrytning. For bademidlene er spredning og fortynning de viktigste prosessene for reduksjon, mens for fôrmidler er det nedbryting. Vi vet at økt nedbør og redusert saltholdighet kan medføre lokale endringer i strømmønster, men det er lav sannsynlighet for at dette skjer på storskala strømsystemer. Det forventes ikke at klimaendringer påvirker spredning og fortynning i en slik grad at det endrer sannsynligheten for høy konsentrasjon i miljøet. Både økende temperatur og havforsuring kan øke nedbrytingen av fôrbaserte legemidler mens redusert oksygennivå kan medføre redusert nedbrytning (Benskin et al., 2016; Hamoutene et al., 2023). Det forventes likevel ikke at klimaendringer påvirker nedbryting i en slik grad at det endrer sannsynligheten for høy konsentrasjon i miljøet.

Vi vurderer at det er økt sannsynlighet for økt utslipp, mens spredning, fortynning og nedbryting ikke vil påvirkes i stor grad. Samlet sett vurderer vi at klimaendringer øker sannsynligheten for «Høy konsentrasjon i miljøet». Vi har noe kunnskap om økt bruk av legemidler og dermed økt utslipp. Men det er få studier på hvordan spredning, fortynning og nedbryting vil påvirkes av klimaendringer. Samlet sett vurderes kunnskapsstyrken som moderat.

Mange arter/nøkkelarter og tidlige livsstadier med høy følsomhet til stede

Det er begrenset med studier tilgjengelig på hvordan klimaeffekter vil påvirke arters følsomhet for legemidler. Studier har vist økt følsomhet for azametifos og deltametrin ved økt temperatur (Mill & Kennedy, 2021; Montory et al., 2023; Tu et al., 2012). Ved lavere saltholdighet er det observert økt følsomhet for deltametrin, men ikke for imidakloprid (Knysh et al., 2021; Tu et al., 2012). Økt havforsuring gjør at konsentrasjonen av karbonationer synker og øker oppløsningen av kalk. Dette kan medføre økt dødelighet og ikke-dødelige effekter hos arter som

er avhengig av kalsium i det ytre skjelettet, som for eksempel koraller, hummer og krabbe (Chan & Connolly, 2013; Leiva et al., 2022; Thangal et al., 2024).

Basert på at studier har vist at både økt temperatur, salinitet og havforsuring kan gi økt følsomhet for legemidler, vurderer vi samlet sett at klimaendringer øker sannsynlighet for at det vil være «Mange arter/nøkkelarter og tidlige livsstadier med høy følsomhet til stede». Samspillet mellom klimaeffekter og arters følsomhet for legemidler er komplekst, og forventes heller ikke å være lik for de ulike legemidlene. Det er gjennomført få studier, og de eksisterende studiene er ikke nødvendigvis relevante for norske arter. Samlet sett vurderer vi kunnskapsstyrken som svak.

Negativ påvirkning på marint miljø grunnet utslipp av legemidler fra fiskeoppdrett

Klimaeffekter kan føre til både økt sannsynlighet for «Høy konsentrasjon i miljøet» og «Mange arter/nøkkelarter og tidlige livsstadier med høy følsomhet til stede». Vi vurderer derfor at det er økt risiko for «Negativ påvirkning på marint miljø grunnet utslipp av legemidler fra fiskeoppdrett». Kunnskapsstyrken vurderes som svak for både «Høy konsentrasjon i miljøet» og «Mange arter/nøkkelarter og tidlige livsstadier med høy følsomhet til stede». Samlet sett vurderes kunnskapsstyrken for «Negativ påvirkning på marint miljø grunnet utslipp av legemidler fra fiskeoppdrett» som svak.

5.6 Mikroorganismesamfunn i marine sediment

5.6.1 Introduksjon

Mikroorganismesamfunn er grunnleggende for økosystemets funksjon, og driver kritiske prosesser som næringsstoffkretsløp, nedbrytning av organisk materiale, nedbrytning av forurensninger og opprettholdelse av jord- og vannkvalitet (Sunagawa et al., 2015). Sammensetning og funksjonell kapasitet i disse mikrobiomene påvirkes sterkt av miljøforhold, inkludert menneskeskapte belastninger som forurensning, klimaendringer og kjemiske inngrep (Song et al., 2025). Mikrobene er de første som reagerer på endringer i økosystemet, og skift i mikrobielle samfunnsstrukturer kan fungere som sensitive indikatorer på økosystemets helse for å forstå påvirkninger og identifisere restaureringsmål for bevaring og bærekraftig forvaltning (Cheng et al., 2025; Lalzar et al., 2023). Mikrobiota i marint sediment er viktige drivere i globale biogeokjemiske sykluser, særlig for karbon-, nitrogen - og svovelkretsløp. De forsyner marine næringsnett med energi, remineraliserer organisk materiale, bryter ned forurensninger og fungerer som sensitive indikatorer på miljøtilstand, og påvirker klimaregulering og næringstilgjengelighet i marine økosystemer. Likevel er påvirkning og rollen til miljømikrobiomer i stor grad uutforsket.

5.6.2 Påvirkning av biocider, tungmetaller og legemidler fra akvakultur på mikrobiota

Antigroemidler brukt i akvakultur forurenser miljøet med antimikrobielle forbindelser som tungmetaller (Cu, Zn og andre biocider), og råstoffene brukt til fôrproduksjon inneholder inneholder små mengder organiske miljøgifter og tungmetallforbindelser. Kobber og sink blir også tilsatt fôret i som sporminerаler for at fisken kan ha god tilvekst (Grefsrud et al., 2024). Disse forbindelsene er kjent for å være giftige for mikrober og kan selektere for patogener og antimikrobiell resistens i sedimentmikrobiomet. Videre påvirker disse utslippene mikrobielt mangfold og derigjennom funksjonene til sedimentmikrobiota (Cabello, 2006; Lindgren et al., 2018). Økte utslipp av biocider som kobber og sink, og muligens andre biocider, i kombinasjon med høyere temperaturer, kan øke sannsynligheten for at bakterier utvikler antimikrobiell resistens (AMR) i patogener som *Vibrio* spp. og *Aeromonas* spp., samt i humane patogener som *Klebsiella* spp (Hetland et al., 2025; Håkonsholm et al., 2023). Dokumenterte koblinger mellom typer og nivåer av metallforurensning og spesifikke mønstre av antibiotikaresistens tyder på at flere mekanismer ligger til grunn for denne koseleksjonsprosessen. Disse koseleksjonsmekanismene inkluderer koresistens (ulike resistensdeterminanter til stede på samme genetiske

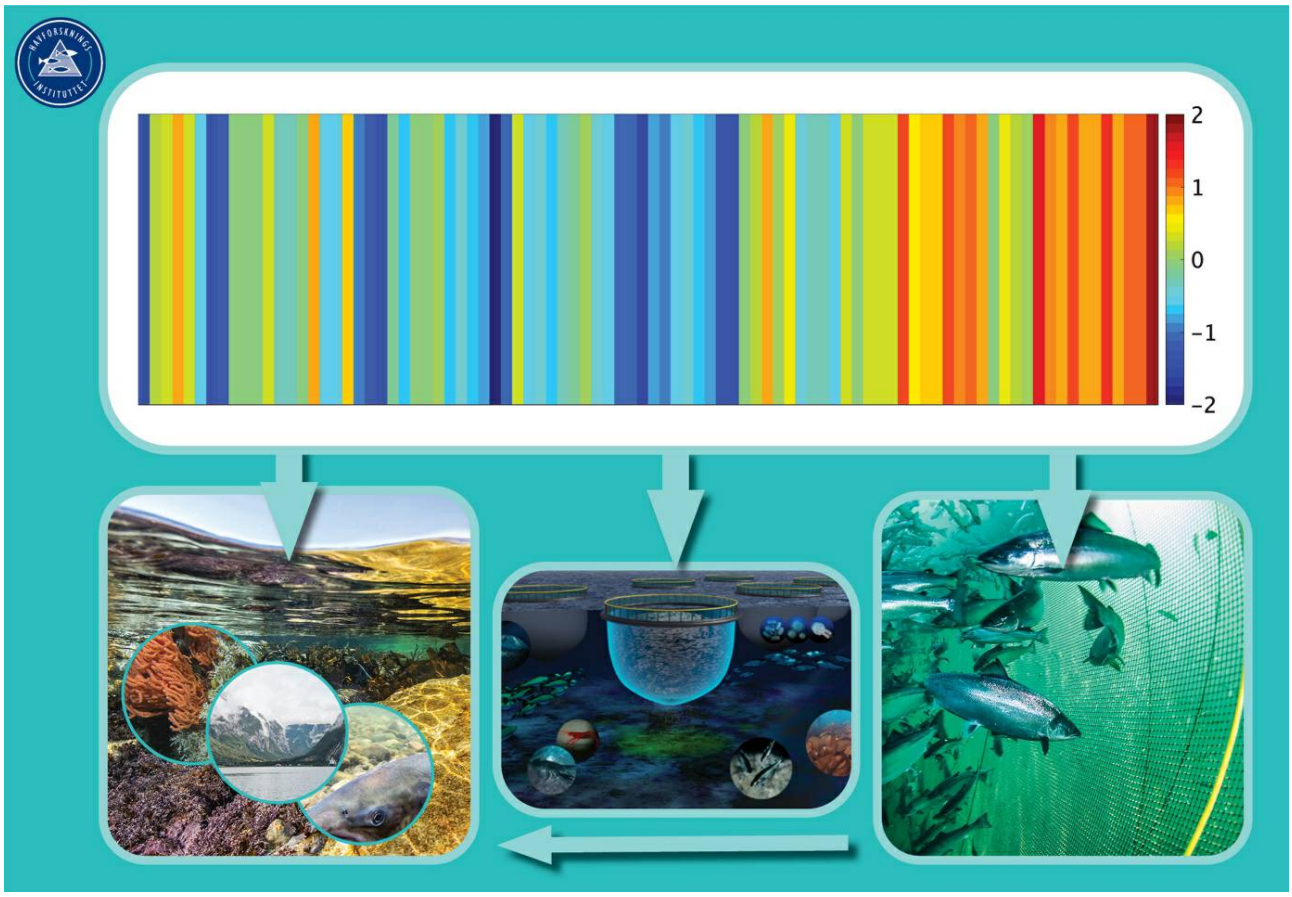
element) og kryssresistens (den samme genetiske determinant som gir resistens mot både antibiotika og metaller). Metallforurensning utgjør derfor et langsiktig, utbredt og vanskelig håndterbart seleksjonstrykk med både miljømessig og klinisk betydning, som mulig bidrar til opprettholdelse og spredning av faktorer for antibiotikaresistens (Flach et al., 2017). Norge har nylig publisert sin nasjonale «One Health» - strategi for AMR (2024–2033) som spesifikt tar for seg hvordan man skal forebygge utvikling av resistens i matsystemene. Legemidler brukt i akvakultur, særlig antibiotika, har stor påvirkning på sedimentmikrobiomer. Selv om antibiotikabruk ikke er utbredt i Norge, brukes antibiotika hyppig i andre områder for lakseoppdrett. Disse antibiotikaene påvirker miljøet ved å endre mikrobielt mangfold og funksjoner samt ved seleksjon av AMR og patogener i miljøet (Adenaya et al., 2023; Cabello et al., 2016).

5.6.3 Kombinert påvirkning av klimaendringer og forurensning på sedimentmikrobiota

Det påpekes at økte temperaturer direkte kan påvirke utvikling av resistens fordi de kan føre til økt vekst og overlevelse av mikroorganismer som bakterier og sopp. Særlig relevant for akvakultur langs kysten er at mer ekstremvær vil føre til hyppigere flom og økt sannsynlighet for uønsket og ukontrollert forurensning fra kloakk og avløpsvann. Klimaendringer kan bidra til å forsterke AMR i akvakultur ved å øke vanntemperaturene, noe som fremmer ukontrollert vekst og formering av sykdomsfremkallende mikroorganismer (patogenproliferasjon) og sykdomsoverføring (Jeyachandran, 2025; van Bavel et al., 2024). Denne syklusen øker antall gener for antimikrobiell resistens i akvatiske miljøer, og truer matsikkerhet og folkehelse. Videre fører høyere temperaturer også ofte til høyere dødelighet hos infiserte akvatiske dyr ved varmere forhold (Reverter et al., 2020).

6 - Oppsummering

For å oppsummere resultatene beskrevet i denne rapporten så deler vi inn i tre tema; oppdrett i et fremtidig klima, miljøeffekter i et fremtidig klima og endring i økosystemet (Fig. 6.1).



Figur 6.1. Øverste panel viser gjennomsnittlig årlig temperaturavvik målt på alle de hydrografiske stasjonene (Fig. 2.1) på 1m dyp fra 1935 til 2025. Bildene under illustrerer de ulike delkapitlene under; oppdrett i et fremtidig klima (høyre), miljøeffekter i et fremtidig klima (midten) og endring i økosystemet (venstre).

For næringen sin del så er det verdt å merke seg at de naturgitte forholdene for å drive oppdrett langs norskekysten endrer seg. Dette øker risikoen for dårlig fiskevelferd og samtidig er det stor usikkerhet knyttet til sykdomsutfordringer og smittespredning. Mer ekstremvær kan også gi større belastning på anleggene og øke sannsynligheten for rømming. Samtidig kan miljøeffekter, spesielt økning i lakselus, bidra til større behov for håndtering og igjen bidra til dårlig fiskevelferd, samt økning i rømmingshendelser.

For forvaltningen så er det viktig å være klar over at klimaendringene påvirker både miljøeffekter av akvakultur direkte, men også sårbarheten til økosystem og kapasiteten til å ta imot økt belastning fra akvakultur. Økosystemet i fjordene blir mindre robust, altså mindre motstandsdyktig mot ulik menneskelig aktivitet.

6.1 Oppdrett i et fremtidig klima

Økt sjøtemperatur, redusert oksygeninnhold i vannet, sterkere lagdeling i vannsøylen og hyppigere hetebølger

vil skape utfordringer for fremtidens akvakultur. Høy temperatur reduserer appetitt, vekst og robusthet, og kan utløse perioder med redusert velferd hos oppdrettsfisken. Hetebølger kan øke smittepresset fra lakselus betydelig og kan gjøre enkelte lokaliteter uegnet for oppdrett.

Varmere vann holder mindre oksygen, samtidig som laksens oksygenbehov øker. Dette påvirker appetitt, vekst, immunforsvar og gjør fisken mer sårbar for håndtering, sykdom og stress. Stor fisk tåler varme og stress dårligst, og stressrelatert dødelighet forventes å øke med økende temperatur.

Klimaendringer skaper bedre forhold for mange patogener gjennom:

- Raskere sykdomsutvikling
- Økt forekomst av lakselus, gjelleamøber og opportunistiske bakterier
- Fremvekst av nye bakteriesykdommer i varmeperioder (f.eks. pasteurellose, SRS)
- Endret geografisk utbredelse av sykdommer (AGD nordover)

Syk laks tåler varme og lavt oksygeninnhold i vannet dårligere, noe som forsterker sykdomsrisiko ytterligere. Patogener kan endre seg når miljøet endrer seg, som kan gjøre at vaksiner slutter å fungere. Det er derfor viktig å opprettholde utviklingen av effektive vaksiner, samtidig kan økt bruk av antibiotika være nødvendig i periode.

Varmere vann og mer lus fører til hyppigere avlusing, sortering og flytting av fisk. Flere behandlinger, mer ekstremvær og økt teknisk belastning på anlegg gir større sannsynlighet for rømming. Rømt fisk kan være smittebærere og utgjør en genetisk trussel mot villaks.

6.2 Miljøeffekter i et fremtidig klima

Økende smittepress fra lakselus - høyere temperatur gir:

- Raskere utvikling og flere generasjoner
- Høyere smitteevne
- Økt skade per lus
- Høyere konsentrasjon av smittsomme lus i vannmassene, særlig i nordlige områder

Dette medfører at sannsynligheten for lakselusindusert dødelighet på vill laksefisk vil øke, spesielt i oppdrettsintensive områder.

Både i forhold til påvirkning på vill laksefisk og dårlig dyrevelferd så vil trolig lakselus fortsette å være den største utfordringen innen norsk laksefiskoppdrett.

Klimaendringene gir:

- Dårligere vannutskifting i enkelte fjorder
- Økt sårbarhet hos både for bløt- og hardbunnssamfunn
- Mer bruk av kobber og andre antigromidler pga. økt begroing
- Større effekter av utslipp (næringssalter, legemidler, miljøgifter)

Dette kan gjøre enkelte lokaliteter uegnet og kreve flytting av produksjon.

Økt belastning på bunnmiljø (bløtbunn og hardbunn)

Klimaendringer gir mer lagdeling og dårligere utskifting av bunnvann i terskelfjorder. Dette fører til lavere oksygennivå i bunnvannet, som gjør at organisk materiale fra oppdrett (fekalier og spillfôr) brytes ned saktere og i større grad bidrar til oksygenmangel og endret bunnfauna. Hardbunnsarter som koraller og krepsdyr er også mer sårbare når havet forsures, og avfallsstoffer fra akvakultur kan ytterligere svekke disse økosystemene.

Mer spredning og opphopning av miljøgifter

Økte temperaturer, mer nedbør og hyppigere stormer påvirker spredning, nedbrytning og biotilgjengelighet av miljøgifter fra oppdrett, som:

- kobber fra impregnerte nøter
- organiske miljøgifter i fôr

Dårligere vannutskifting øker sannsynligheten for lokal opphopning, og arter blir mer sårbare når miljøforholdene samtidig svekkes av klimaendringer.

Høyere temperaturer fører til mer begroing på nøter. Dette øker behovet for:

- hyppigere notvask
- mer bruk av kobberholdige og andre antigromidler

Utslipp av disse stoffene kan påvirke både bunnmiljøet og organismene i vannsøylen.

Økt bruk og utslipp av legemidler

Mer lakselus og hyppigere behandlinger i et varmere klima kan føre til:

- større utslipp av avlusningsmidler
- økte utslipp av antibiotika (dersom bakteriesykdommer øker og det ikke utvikles vaksiner)
- økt påvirkning på følsomme arter når temperatur, saltholdighet og pH endrer legemidlenes effekt i miljøet

Spesielt i fjorder med begrenset vannutskifting kan dette bli alvorlig.

6.3 Et økosystem i endring

Økosystemet i fjordene blir mindre robust, altså mindre motstandsdyktig mot ulik menneskelig aktivitet. Klimaendringene reduserer økosystemets evne til å absorbere belastningen fra oppdrett, gjennom:

- Økt lagdeling
- Mørkere vann
- Økte temperaturer
- Endret planktonsamfunn
- Redusert oksygentilgang

- Økt frekvens av ekstremhendelser

Dette øker sannsynligheten for lokal miljøforringelse og strengere reguleringer.

Villfisk (laks, sjøørret, sjørøye) blir mer sårbare for:

- Lakselus
- Smitte fra andre patogener
- Endret vannføring og temperatur
- Redusert mattilgang i havet

Dermed øker sannsynligheten for strengere tiltak som begrenser akvakulturproduksjon.

Klimaendringene gjør at økosystemets toleransevindu smalner, noe som betyr at naturen tåler mindre belastning fra oppdrett enn tidligere. Økt temperatur, mer lagdeling i vannet, redusert oksygeninnhold og hyppigere ekstremhendelser fører til at kyst- og fjordøkosystemer blir mer sårbare. Dette forsterkes særlig i fjorder med grunne terskler, der dårlig utskifting av bunnvannet skaper langvarig oksygensvinn og økt sannsynlighet for økologisk forringelse. Marine hetebølger, som blir både hyppigere og kraftigere, kan bidra til massedød av tareskog og økende temperatur kan endre artssammensetningen i kystsonen. Havforsuring svekker skallbyggende organismer som plankton, kalkalger og koraller, noe som gjør hele næringsnettet mer utsatt for påvirkning.

Når saltholdighet og lysforhold endres som følge av økt avrenning og mørkere vann, forskyves balansen i planktonsamfunnene. Dette kan redusere mattilgangen for både villfisk og marine beitedyr, og gir konkurransefortrinn til arter som trives i økosystem i endring, som maneter. Hardbunnssamfunn som koraller og ruglbunn blir også mer utsatt, fordi både havforsuring og avfallsstoffer fra oppdrett dersom anlegg legges nær korallforekomster svekker vekstevnen deres ytterligere.

De ville laksefiskene påvirkes av endret vannføring i elver, høye elvetemperaturer og kan få forskjøvet tidspunkt for smoltutvandring. Dette igjen kan påvirke mattilgangen de opplever langs kysten og i havet. Blant laksefisk er sjørøye den mest sårbare arten. Den er sterkt tilpasset kaldt vann, og selv moderate temperaturøkninger gir fysiologisk stress, redusert vekst og dårligere overlevelse. Sjøørret kan i utgangspunktet håndtere varmere vann bedre, men også sjøørret kan oppleve forringet forhold på grunn av økt press fra lakselus.

For villaks vil forskjøvet tidspunkt for smoltutvandring og endret produktivitet i havet påvirke næringstilgangen. I havet kan varmeperioder og økosystemendringer redusere mattilgangen. I tillegg kan klimaendringene forsterke effekten av smitte fra oppdrett ved at patogener og parasitter trives bedre i et varmere hav.

Samlet viser rapporten at økosystemet, korall- og hardbunnssamfunn, plankton, makroalger, fjordbunn, vill laksefisk (særlig sjørøye) og flere næringsnett blir betydelig mer sårbare. Klimaendringene virker i tillegg sammen med eksisterende belastninger fra oppdrett, som utslipp, organisk belastning, smitte og rømming, slik at effektene forsterkes og tålegrensene kan overskrides raskere enn tidligere.

6.4 Kunnskapshull

Flere kunnskapshull som gir økt usikkerhet

Rapporten understreker manglende kunnskap om:

- Patogener i et varmere klima
- Langtidseffekter av marine hetebølger
- Ernæringsbehov ved høy temperatur
- Effekter på stor fisk
- Fjordsirkulasjon og oksygendynamikk

Fremtidig klima og lokalitetsspesifikke effekter

Det er betydelig usikkerhet knyttet til hvordan klimaendringer konkret vil slå ut i ulike fjorder og kystområder, særlig fordi:

- fjorder har svært ulik sirkulasjon og terskeldybde
- klimaendringer påvirker temperatur, lagdeling, nedbør og saltholdighet på komplekse måter
- modellene har begrenset presisjon på lokalt nivå

Klimaeffekter på smitte, sykdom og patogener

Et av de største kunnskapshullene gjelder hvordan klimaendringer påvirker smitte- og sykdomsdynamikk, spesielt:

- temperatur- og oksygenavhengige endringer i sykdomsforløp
- hvordan ulike virus, bakterier og parasitter reagerer på endrede miljøforhold
- hvordan nye (eksotiske) patogener kan etablere seg i norsk miljø
- effekten av hyppigere behandling og stress på sykdomsutvikling
- smittespredning mellom oppdrett og villfisk under nye klimaforhold

Effekter av klimastress på oppdrettslaks

Selv om fysiologien til laks er godt kartlagt ved forskjellige temperaturer og oksygenforhold, mangler vi kunnskap om:

- hvorfor store individer (>3 kg) er mer sårbare overfor varme, hypoksi og håndtering, og hvilke mekanismer som begrenser stor fisk (særlig gjelle og hjertefunksjon).
- hvordan kronisk klimastress påvirker immunforsvar og robusthet
- langsiktige effekter av marine hetebølger på dødelighet, vekst, uønsket kjønnsmodning, og ernæringsbehov ved ulike livsfaser
- interaksjonen mellom høye temperaturer og produksjonslidelser (katarakt, deformiteter, oksidativt stress)
- Potensialet for kunstig seleksjon av en mere klimarobust oppdrettsfisk.
- Produksjon av robust steril fisk, som ikke klarer seg betydelig dårligere på høy temperatur.
- Effekt av tidlig miljøhistorikk på klimarobusthet senere i livet i sjøen.

- Negative synergieffekter mellom høy temperatur, hypoksi og andre vanlige stressfaktorer i oppdrettsmiljøet (bl.a. sykdom, håndtering).
- Egnethet for nye produksjonsteknologier (semi-lukket, nedsenket, havbruk til havs).

Økosystemeffekter (plankton, makroalger, bunnsamfunn)

Rapporten viser betydelige kunnskapshull om:

- hvordan klimaendringer påvirker nedbrytning av organisk materiale i fjorder
- effekten av kombinerte påvirkninger (forsuring + økt temperatur + utslipp) på koraller og hardbunn
- hvordan mørkere vann, økt ferskvannpåvirkning, økte utslipp fra land og økt temperaturpåvirker næringsnett og konkurranseforhold
- hvordan økt organisk belastning vil påvirke bløtbunn i fjorder med dårlig vannutskifting

Rømming og genetisk påvirkning på villaks

Det finnes lite kunnskap om:

- hvordan klimaendringer vil påvirke rømmingshyppighet fremover
- hvordan klimaendringer endrer villaksens robusthet mot genetisk innkryssing og om det vil variere geografisk mellom sør og nord
- hvor effektivt utfisking fungerer under hyppigere ekstremvær og høy vannføring
- Hvordan klimaendringer vil påvirke atferd av rømt laks (sannsynlighet for å vandre opp i elver)

Virkning av klimaendringer på legemidler og miljøgifter

Rapporten viser betydelig usikkerhet knyttet til:

- hvordan temperatur, pH, saltholdighet og oksygen påvirker nedbryting av legemidler
- hvordan klimaendringer endrer spredning av miljøgifter
- samvirkning mellom klimaendringer og økende antibiotikaresistens hos miljøbakterier

Referanser

Adenaya, A., Berger, M., Brinkhoff, T., Ribas-Ribas, M., & Wurl, O. (2023). Usage of antibiotics in aquaculture and the impact on coastal waters. *Marine Pollution Bulletin*, *188*, 114645. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114645

Aksnes, D. L., Aure, J., Johansen, P.-O., Johnsen, G. H., & Vea Salvanes, A. G. (2019). Multi-decadal warming of Atlantic water and associated decline of dissolved oxygen in a deep fjord. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *228*. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106392

Alfonso, S., Gesto, M., & Sadoul, B. (2021). Temperature increase and its effects on fish stress physiology in the context of global warming. *Journal of Fish Biology*, *98*(6), 1496–1508. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jfb.14599

Altizer, S., Ostfeld, R. S., Johnson, P. T., Kutz, S., & Harvell, C. D. (2013). Climate change and infectious diseases: from evidence to a predictive framework. *Science*, *341*(6145), 514–519. https://doi.org/10.1126/science.1239401

Andersen, L. B., Grefsrud, E. S., Svåsand, T., & Sandlund, N. (2022). Risk understanding and risk acknowledgement: a new approach to environmental risk assessment in marine aquaculture. *ICES Journal of Marine Science*, *79*, 987–996.

Anttila, K., Dhillon, R. S., Boulding, E. G., Farrell, A. P., Glebe, B. D., Elliott, J. A. K., Wolters, W. R., & Schulte, P. M. (2013). Variation in temperature tolerance among families of Atlantic salmon (Salmo salar) is associated with hypoxia tolerance, ventricle size and myoglobin level. *Journal of Experimental Biology*, *216*(7), 1183–1190. https://doi.org/10.1242/jeb.080556

Ashton-Key, H., Mecking, J., Marsh, R., Drijfhout, S., Oltmanns, M., & Sanchez-Franks, A. (2026). Amoc weakening across latitude and time in cmip6 future scenarios. *EGUsphere*, *2026*, 1–41.

Atroch, F., Rangel, L. F., Ayra-Pardo, C., & Santos, M. J. (2026). Climate Change, Fish and Shellfish, and Parasite Dynamics: A Comprehensive Review. *Journal of Marine Science and Engineering*, *14*(2), 167.

Baker-Austin, C., Oliver, J. D., Alam, M., Ali, A., Waldor, M. K., Qadri, F., & Martinez-Urtaza, J. (2018). Vibrio spp. infections. *Nature Reviews Disease Primers*, *4*(1), 1–19. https://doi.org/10.1038/s41572-018-0005-8

Bakke, T., & Harris, P. D. (1998). *Diseases and parasites in wild Atlantic salmon (Salmo salar) populations* (Vol. 55). https://doi.org/10.1139/cjfas-55-S1-247

Bao, S., Pan, Y., Li, Y., Wang, H., Du, J., & Cheng, L. (2026). Ocean heat content in 2025. *Nature Reviews Earth & Environment*.

Beck, S. V., Kess, T., Nugent, C. M., Dempson, J. B., Chaput, G., Arno, H. E., Duffy, S., Smith, N., Bentzen, P., Kent, M., Pritchard, V. L., & Bradbury, I. R. (2025). Genomic Basis and Climate Change Vulnerability of Migration Timing in Atlantic Salmon (Salmo salar). *Evol Appl*, *18*(10), e70148. https://doi.org/10.1111/eva.70148

Bednarska, A. J., Jevtić, D. M., & Laskowski, R. (2013). More ecological ERA: incorporating natural

environmental factors and animal behavior. *Integr Environ Assess Manag*, *9*(3), e39–46. https://doi.org/10.1002/ieam.1444

Benfey, T. J., Gonen, S., Bartlett, C. B., & Garber, A. F. (2024). Thermal tolerance has high heritability in Atlantic salmon, Salmo salar. *Aquaculture Reports*, *37*, 102249.

Benskin, J. P., Ikonomou, M. G., Surridge, B. D., Dubetz, C., & Klaassen, E. (2016). Biodegradation potential of aquaculture chemotherapeutants in marine sediments. *Aquaculture Research*, *47*(2), 482–497. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/are.12509

Besnier, F., Ayllon, F., Skaala, Ø., Solberg, M. F., Fjeldheim, P. T., Anderson, K., Knutar, S., & Glover, K. A. (2022). Introgression of domesticated salmon changes life history and phenology of a wild salmon population. *Evol Appl*, *15*(5), 853–864. https://doi.org/10.1111/eva.13375

Bindoff, N. L., Cheung, W. W. L., Kairo, J. G., Aristegui, J., Guinder, V. A., Hallberg, R., Hilmi, H., Jiao, N., Karim, M. S., Levin, L., O'Donoghue, S., Purca Cuicapusa, S. R., Rinkevich, B., Suga, T., Tagliabue, A., & Williamson, P. (2019). Changing Ocean, Marine Ecosystems, and Dependent Communities. In H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, & N. M. Weyer (Eds.), *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*.

Bjørn, P. A., Finstad, B., Kristoffersen, R., McKinley, R. S., & Rikardsen, A. H. (2007). Differences in risks and consequences of salmon louse, Lepeophtheirus salmonis (Krøyer), infestation on sympatric populations of Atlantic salmon, brown trout, and Arctic charr within northern fjords. *ICES Journal of Marine Science*, *64*(2), 386–393. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsl029

Blindheim, S., Andersen, L., Trösse, C., Karlsbakk, E., & Nylund, A. (2023). Growth characteristics and morphology of Paramoeba perurans from Atlantic salmon Salmo salar L. and ballan wrasse Labrus bergylta in Norway. *Parasit Vectors* , *16* (1), 112. https://doi.org/10.1186/s13071-023-05715-2

Boehm, A. B., Graham, K. E., & Jennings, W. C. (2018). Can We Swim Yet? Systematic Review, Meta-Analysis, and Risk Assessment of Aging Sewage in Surface Waters. *Environ Sci Technol*, *52*(17), 9634–9645. https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01948

Boehm, A. B., Silverman, A. I., Schriewer, A., & Goodwin, K. (2019). Systematic review and meta-analysis of decay rates of waterborne mammalian viruses and coliphages in surface waters. *Water Res* , *164* , 114898. https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.114898

Bolstad, G. H., Hindar, K., Robertsen, G., Jonsson, B., Sægrov, H., Diserud, O. H., Fiske, P., Jensen, A. J., Urdal, K., Næsje, T. F., Barlaup, B. T., Florø-Larsen, B., Lo, H., Niemelä, E., & Karlsson, S. (2017). Gene flow from domesticated escapes alters the life history of wild Atlantic salmon. *Nat Ecol Evol*, *1*(5), 124. https://doi.org/10.1038/s41559-017-0124

Brooker, A. J., Skern-Mauritzen, R., & Bron, J. E. (2018). Production, mortality, and infectivity of planktonic larval sea lice, Lepeophtheirus salmonis (Krøyer, 1837): current knowledge and implications for epidemiological modelling. *ICES Journal of Marine Science*, *75*(4), 1214–1234. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsy015

Bærum, K. M., Finstad, A. G., Ulvan, E. M., & Haugen, T. O. (2021). Population consequences of climate change through effects on functional traits of lentic brown trout in the sub-Arctic. *Scientific*

Reports, *11*(1), 15246. https://doi.org/10.1038/s41598-021-94350-x

Cabello, F. C. (2006). Heavy use of prophylactic antibiotics in aquaculture: a growing problem for human and animal health and for the environment. *Environ Microbiol*, *8*(7), 1137–1144. https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2006.01054.x

Cabello, F. C., Godfrey, H. P., Buschmann, A. H., & Dölz, H. J. (2016). Aquaculture as yet another environmental gateway to the development and globalisation of antimicrobial resistance. *Lancet Infect Dis*, *16*(7), e127–e133. https://doi.org/10.1016/s1473-3099(16)00100-6

Chaikin, S., González-Trujillo, J. D., & Araújo, M. B. (2026). Long-term warming reduces fish biomass, but heatwaves shift it. *Nat Ecol Evol*. https://doi.org/10.1038/s41559-026-03013-5

Chan, N. C. S., & Connolly, S. R. (2013). Sensitivity of coral calcification to ocean acidification: a meta-analysis. *Global Change Biology*, *19*(1), 282–290. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/gcb.12011

Cheng, W. H., Miki, T., Lai, C. C., Shiah, F. K., Ko, C. Y., Hsieh, C. H., & Chang, C. W. (2025). Biodiversity Consistently Promotes Ecosystem Multifunctionality Across Multiple Temporal Scales in an Aquatic Microbial Community. *Ecol Lett* , *28* (8), e70185. https://doi.org/10.1111/ele.70185

Christie, H., Andersen, G. S., Bekkby, T., Fagerli, C. W., Gitmark, J. K., Gundersen, H., & Rinde, E. (2019). Shifts Between Sugar Kelp and Turf Algae in Norway: Regime Shifts or Fluctuations Between Different Opportunistic Seaweed Species? [Original Research]. *Frontiers in Marine Science*, *Volume 6 - 2019*. https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00072

Chust, G., Allen, J. I., Bopp, L., Schrum, C., Holt, J., Tsiaras, K., Zavatarelli, M., Chifflet, M., Cannaby, H., Dadou, I., Daewel, U., Wakelin, S. L., Machu, E., Pushpadas, D., Butenschon, M., Artioli, Y., Petihakis, G., Smith, C., Garcon, V.,…Irigoien, X. (2014). Biomass changes and trophic amplification of plankton in a warmer ocean. *Glob Chang Biol*, *20*(7), 2124–2139. https://doi.org/10.1111/gcb.12562

Collins, C., Bresnan, E., Brown, L., Falconer, L., Guilder, J., Jones, L., Murray, A., & Stanley, M. (2020). Impacts of climate change on aquaculture. *MCCIP Science Review 2020*, 482–520.

Condie, S. A., & Bormans, M. (1997). The Influence of Density Stratification on Particle Settling, Dispersion and Population Growth. *Journal of Theoretical Biology*, *187*(1), 65–75. https://doi.org/https://doi.org/10.1006/jtbi.1997.0417

Dalvin, S., Are Hamre, L., Skern-Mauritzen, R., Vågseth, T., Stien, L., Oppedal, F., & Bui, S. (2020). The effect of temperature on ability of Lepeophtheirus salmonis to infect and persist on Atlantic salmon. *Journal of Fish Diseases*, *43*(12), 1519–1529. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jfd.13253

Davidovich, N., Morick, D., & Carella, F. (2020). Mycobacteriosis in Aquatic Invertebrates: A Review of Its Emergence. *Microorganisms*, *8*(8), 1249.

Delghandi, M. R., El-Matbouli, M., & Menanteau-Ledouble, S. (2020). Renibacterium salmoninarum—The Causative Agent of Bacterial Kidney Disease in Salmonid Fish. *Pathogens*, *9*(10), 845.

Dempster, T., Wright, D., & Oppedal, F. (2016). Identifying the nature, extent and duration of critical production periods for Atlantic salmon in Macquarie harbour, Tasmania, during summer. *Fisheries Research and Development Corporation Report*.

Diaz, R., & Rosenberg, R. (1995). Marine benthic hypoxia: A review of its ecological effects and the

behavioural response of benthic macrofauna. *Oceanography and marine biology. An annual review [Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev.]* , *33* , 245–303.

Diserud, O. H., Fiske, P., Karlsson, S., Glover, K. A., Næsje, T., Aronsen, T., Bakke, G., Barlaup, B. T., Erkinaro, J., Florø-Larsen, B., Foldvik, A., Heino, M., Kanstad-Hanssen, Ø., Lo, H., Lund, R. A., Muladal, R., Niemelä, E., Økland, F., Østborg, G. M.,…Hindar, K. (2022). Natural and anthropogenic drivers of escaped farmed salmon occurrence and introgression into wild Norwegian Atlantic salmon populations. *ICES Journal of Marine Science*, *79*(4), 1363–1379. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsac060

Diserud, O. H., Hindar, K., Karlsson, S., Glover, K., & Skaala, Ø. (2023). *Genetisk påvirkning av rømt oppdrettslaks på ville laksebestander - oppdatert status 2023* (NINA Rapport 2393, Issue 2393).

Donati, V. L., Lorenzen, N., & Madsen, L. (2026). Effects of Increased Water Salinity and Temperature on the Development of Rainbow Trout Fry Syndrome (RTFS) Caused by Flavobacterium psychrophilum. *J Fish Dis*, *49*(2), e70037. https://doi.org/10.1111/jfd.70037

Doney, S. C., Ruckelshaus, M., Emmett Duffy, J., Barry, J. P., Chan, F., English, C. A., Galindo, H. M., Grebmeier, J. M., Hollowed, A. B., Knowlton, N., Polovina, J., Rabalais, N. N., Sydeman, W. J., & Talley, L. D. (2012). Climate Change Impacts on Marine Ecosystems. *Annual Review of Marine Science*, *4*(Volume 4, 2012), 11–37. https://doi.org/https://doi.org/10.1146/annurev-marine-041911-111611

Dunmall, K. M., Bean, C. W., Berntsen, H. H., Ensing, D., Erkinaro, J., Irvine, J. R., Kendall, N. W., Kitching, T., Langan, J. A., Millane, M., Oxman, D. S., Radchenko, V. I., Thorstad, E. B., & Utne, K. R. (2025). Invading and range-expanding pink salmon inform management actions for marine species on the move. *ICES Journal of Marine Science*, *82*(1), fsae199. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsae199

Dunn, A. M., & Hatcher, M. J. (2015). Parasites and biological invasions: parallels, interactions, and control. *Trends in Parasitology*, *31*(5), 189–199. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pt.2014.12.003

Dyrrdal, A. V., Bakke, S. J., Hanssen-Bauer, I., Mayer, S., Nilsen, I. B., Nilsen, J. E. Ø., Paasche, Ø., Saloranta, T., & Årthun, M. (2025). *Klima i Norge – kunnskapsgrunnlag for klimatilpasning oppdatert i 2025* (NCCS-rapport 1/2025, Issue 1).

Egidius, E. (1987). Import of furunculosis to Norway with Atlantic salmon smolts from Scotland. *ICES CM 1987/F*.

Erlingsdóttir, Á., & Kristmundsson, Á. (2026). Identification of Chaetozone setosa (Cirratulidae) as the definitive host in the life cycle of Parvicapsula pseudobranchicola infecting Atlantic salmon (Salmo salar). *International Journal for Parasitology* , 104799. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijpara.2026.104799

Feng, J., Durant, J. M., Stige, L. C., Hessen, D. O., Hjermann, D. Ø., Zhu, L., Llope, M., & Stenseth, N. C. (2015). Contrasting correlation patterns between environmental factors and chlorophyll levels in the global ocean. *Global Biogeochemical Cycles*, *29*(12), 2095–2107. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2015GB005216

Ferguson, H. W. (1979). Scanning and transmission electron microscopical observations on Hexamita salmonis (Moore, 1922) related to mortalities in rainbow trout fry Salmo gairdneri Richardson. *Journal of Fish Diseases*, *2*, 57–67. https://doi.org/10.1111/j.1365-2761.1979.tb00140.x

Ficke, A. D., Myrick, C. A., & Hansen, L. J. (2007). Potential impacts of global climate change on freshwater fisheries. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, *17*(4), 581–613. https://doi.org/10.1007/s11160-007-9059-5

Filbee-Dexter, K., Wernberg, T., Grace, S. P., Thormar, J., Fredriksen, S., Narvaez, C. N., Feehan, C. J., & Norderhaug, K. M. (2020). Marine heatwaves and the collapse of marginal North Atlantic kelp forests. *Scientific Reports*, *10*(1), 13388. https://doi.org/10.1038/s41598-020-70273-x

Fjelldal, P. G., Hansen, T., Breck, O., Ørnsrud, R., Lock, E. J., Waagbø, R., Wargelius, A., & Eckhard Witten, P. (2012). Vertebral deformities in farmed Atlantic salmon (Salmo salar L.) – etiology and pathology. *Journal of Applied Ichthyology*, *28*(3), 433–440. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1439-0426.2012.01980.x

Fjelldal, P. G., Hansen, T. J., Karlsen, Ø., & Wright, D. W. (2019). Effects of laboratory salmon louse infection on Arctic char osmoregulation, growth and survival. *Conservation Physiology*, *7*(1), coz072. https://doi.org/10.1093/conphys/coz072

Flach, C. F., Pal, C., Svensson, C. J., Kristiansson, E., Östman, M., Bengtsson-Palme, J., Tysklind, M., & Larsson, D. G. J. (2017). Does antifouling paint select for antibiotic resistance? *Sci Total Environ*, *590-591*, 461–468. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.213

Fleming, I. A., Hindar, K., Mjølnerød, I. B., Jonsson, B., Balstad, T., & Lamberg, A. (2000). Lifetime success and interactions of farm salmon invading a native population. *Proc Biol Sci*, *267*(1452), 1517–1523. https://doi.org/10.1098/rspb.2000.1173

Fournier, K. C., Marcoux, P.-É., Vincent, A. T., & Charette, S. J. (2025). Strain-Dependent Thermoadaptation in the Fish Pathogen Aeromonas salmonicida subsp. salmonicida. *Microorganisms* , *13* (9), 2171.

Frantzen, S., Boitsov, S., Dehnhard, N., Duinker, A., Grøsvik, B. E., Heimstad, E., Hjermann, D., Jensen, H., Jensen, L. K., Leiknes, Ø., Nilsen, B., Routti, H., Schøyen, M., & Skjerdal, H. K. (2021). *Forurensning i de norske havområdene - Barentshavet, Norskehavet og Nordsjøen* (Rapport fra overvåkingsgruppen, Issue.

Fraser, T. W. K., Sambraus, F., Remø, S. C., Stien, L. H., Hansen, T. J., & Fjelldal, P. G. (2025). Growth, sexual maturation, cataracts, and blood biochemistry in diploid and triploid Atlantic salmon post-smolts reared at one of eight constant temperatures from 3.0 to 20.5 °C for 140 days. *Aquaculture* , *602* , 742323.

Frigstad, H., Andersen, G. S., Trannum, H. C., McGovern, M., Naustvoll, L.-J., Kaste, Ø., Deininger, A., & Hjermann, D. Ø. (2023). Three decades of change in the Skagerrak coastal ecosystem, shaped by eutrophication and coastal darkening. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *283*, 108193. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecss.2022.108193

Fry, F. E. J. (1971). The effect of environmental factors on the physiology of fish. In W. S. Hoar & D. J. Randall (Eds.), *Fish Physiology* (Vol. 6, pp. 1–98). Academic Press.

Føre, H. M., & Thorvaldsen, T. (2021). Causal analysis of escape of Atlantic salmon and rainbow trout from Norwegian fish farms during 2010–2018. *Aquaculture*, *532*, 736002. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.736002

Gamperl, A. K., Ajiboye, O. O., Zanuzzo, F. S., Sandrelli, R. M., Peroni, E. F. C., & Beemelmanns, A. (2020). The impacts of increasing temperature and moderate hypoxia on the production characteristics, cardiac morphology and haematology of Atlantic salmon (Salmo salar). *Aquaculture*, *519*, 734874.

Gillson, J. P., Bašić, T., Davison, P. I., Riley, W. D., Talks, L., Walker, A. M., & Russell, I. C. (2022). A review of marine stressors impacting Atlantic salmon Salmo salar, with an assessment of the major threats to English stocks. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, *32*(3), 879–919. https://doi.org/10.1007/s11160-022-09714-x

Giulietti, L., Levsen, A., Bao, M., Karlsbakk, E., Storesund, J. E., Tung, H. S., & Cipriani, P. (2025). First Report of 'Soft Flesh' Induced by the Parasite Kudoa thyrsites (Myxosporea) in Commercial Codfish From Norway. *J Fish Dis* , *48* (4), e14067. https://doi.org/10.1111/jfd.14067

Gjedrem, T., Robinson, N., & Rye, M. (2012). The importance of selective breeding in aquaculture to meet future demands for animal protein: a review. *Aquaculture* , *350* , 117–129.

Glover, K., Quintela, M., Wennevik, V., Besnier, F., Sorvik, A. G., & Skaala, Ø. (2012). Three decades of farmed escapees in the wild: a spatio-temporal analysis of Atlantic salmon population genetic structure throughout Norway. *PLoS One*, *7*(8), e43129.

Gonen, S., Benfey, T. J., & Garber, A. F. (2024). The genomic architecture of high temperature tolerance in a year class of Atlantic salmon. *Aquaculture* , *578* , 740020.

Gonzalez, S., Sandvik, A. D., Jensen, M. F., Albretsen, J., Sandø, A. B., Ingvaldsen, R. B., Hjøllo, S. S., & Vikebø, F. (2025). Drivers of the summer 2024 marine heatwave and record salmon lice outbreak in northern Norway. *Communications Earth & Environment*, *6*(1), 639. https://doi.org/10.1038/s43247-025-02618-1

Grefsrud, E. S., Agnalt, A. L., Andersen, L. B., Bui, S., Bøhn, T., Dalvin, S., Diserud, O. H., Dunlop, K. M., Escobar, R., Fiske, P., Folkedal, O., Geitung, L., Glover, K., Grøsvik, B. E., Halvorsen, K., Hannisdal, R., Harvey, A., Hjøllo, S. S., Husa, V.,…Utne, K. R. (2026). *Risikorapport norsk fiskeoppdrett 2026* (Rapport fra havforskningen 2026-10, Issue 10).

Grefsrud, E. S., Andersen, L. B., Agnalt, A. L., Bui, S., Bøhn, T., Diserud, O. H., Dunlop, K. M., Fiske, P., Folkedal, O., Geitung, L., Glover, K., Grøsvik, B. E., Halvorsen, K., Hannisdal, R., Hansen, P. K., Hindar, K., Hjøllo, S. S., Husa, V., Jansson, E.,…Wennevik, V. (2025). *Risikorapport norsk fiskeoppdrett 2025* (Rapport fra havforskningen 2025-14, Issue 14).

Grefsrud, E. S., Glover, K., Grøsvik, B. E., Husa, V., Karlsen, Ø., Kristiansen, T., Kvamme, B. O., Mortensen, S., Samuelsen, O. B., Stien, L. H., & Svåsand, T. (2018). *Risikorapport norsk fiskeoppdrett 2018* (Fisken og havet, Issue.

Grenier, G., Rochat, E. C., Muladal, R., Jensen, H., & Knudsen, R. (2023). Salmon-lice as a potential threat to anadromous Arctic charr populations. *Journal of Fish Diseases* , *46* (5), 465–475. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jfd.13758

Gunnarsson, G. S., Karlsbakk, E., Blindheim, S., Plarre, H., Imsland, A. K., Handeland, S., Sveier, H., & Nylund, A. (2017). Temporal changes in infections with some pathogens associated with gill disease in farmed Atlantic salmon (Salmo salar L). *Aquaculture*, *468*, 126–134. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.10.011

Guo, Y., Liu, Y., Gao, S., Zhou, X., Sivakumar, M., & Jiang, G. (2023). Effects of Temperature and Water Types on the Decay of Coronavirus: A Review. *Water*, *15*(6), 1051.

Guo, Y., Sivakumar, M., & Jiang, G. (2022). Decay of four enteric pathogens and implications to wastewater-based epidemiology: Effects of temperature and wastewater dilutions. *Science of The Total Environment*, *819*, 152000. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152000

Hamoutene, D., Kingsbury, M., Davies, J., Le, A., Blais, D. R., & Gagnon, M. (2023). The persistence of emamectin benzoate in marine sediments with different organic matter regimes, temperature conditions, and antibiotic presence. *Marine Pollution Bulletin*, *197*, 115714. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115714

Hamre, L. A., Bui, S., Oppedal, F., Skern-Mauritzen, R., & Dalvin, S. (2019). Development of the salmon louse Lepeophtheirus salmonis parasitic stages in temperatures ranging from 3 to 24°C. *Aquaculture Environment Interactions*, *11*, 429–443.

Handeland, S. O., Björnsson, B. T., Arnesen, A. M., & Stefansson, S. O. (2003). Seawater adaptation and growth of post-smolt Atlantic salmon (Salmo salar) of wild and farmed strains. *Aquaculture*, *435*, 354–360.

Handeland, S. O., Imsland, A. K., & Stefansson, S. O. (2008). The effect of temperature and fish size on growth, feed intake, food conversion efficiency and stomach evacuation rate of Atlantic salmon post-smolts. *Aquaculture* , *283* , 36–42.

Hansen, H., Karlsbakk, E., Hahn, C., Qviller, L., Spilsberg, B., Sakariassen, T., Ruud, K., & Sevatdal, S. (2022). *Infeksjoner med bendelorm Eubothrium sp. i oppdrettsanlegg i Norge: resistens, utbredelse og påvirkning på fiskehelsen* (VI-rapport 2022, Issue.

Hansen, T. J., Olsen, R. E., Stien, L. H., Oppedal, F., Torgersen, T., Breck, O., Remen, M., Vågseth, T., & Fjelldal, P. G. (2015). Effect of water oxygen level on performance of diploid and triploid Atlantic salmon post-smolts reared at high temperature. *Aquaculture* , *435* , 354–360.

Harvey, A., Skaala, Ø., Borgstrøm, R., Fjeldheim, P. T., Christine Andersen, K., Rong Utne, K., Askeland Johnsen, I., Fiske, P., Winterthun, S., Knutar, S., Sægrov, H., Urdal, K., & Alan Glover, K. (2022). Time series covering up to four decades reveals major changes and drivers of marine growth and proportion of repeat spawners in an Atlantic salmon population. *Ecol Evol*, *12*(4), e8780. https://doi.org/10.1002/ece3.8780

Harvey, A. C., Glover, K. A., Wennevik, V., & Skaala, Ø. (2020). Atlantic salmon and sea trout display synchronised smolt migration relative to linked environmental cues. *Scientific Reports*, *10*(1), 3529. https://doi.org/10.1038/s41598-020-60588-0

Harvey, A. C., Skaala, Ø., Besnier, F., Østebø, B. I., Sørvik, A. G., Fjeldheim, P. T., Unneland, L., Brieuc, M. S. O., Ayllon, F., Utne, K. R., Solberg, M. F., & Glover, K. A. (2026). Domestication-Admixed Atlantic Salmon (Salmo salar) Establish a Productive Population in the Wild. *Ecol Lett* , *29* (2), e70319. https://doi.org/10.1111/ele.70319

Hedger, R., Sundt-Hansen, L., Forseth, T., Ugedal, O., Diserud, O., Kvambekk, Å., & Finstad, A. (2013). Predicting climate change effects on subarctic–Arctic populations of Atlantic salmon (Salmo salar). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, *70*, 159–168. https://doi.org/10.1139/cjfas-2012-

0205

Hennige, S. J., Wicks, L. C., Kamenos, N. A., Perna, G., Findlay, H. S., & Roberts, J. M. (2015). Hidden impacts of ocean acidification to live and dead coral framework. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, *282*(1813), 20150990. https://doi.org/10.1098/rspb.2015.0990

Hetland, M. A. K., Winkler, M. A., Kaspersen, H. P., Håkonsholm, F., Bakksjø, R. J., Bernhoff, E., Delgado-Blas, J. F., Brisse, S., Correia, A., Fostervold, A., Lam, M. M. C., Lunestad, B. T., Marathe, N. P., Raffelsberger, N., Samuelsen, Ø., Sunde, M., Sundsfjord, A., Urdahl, A. M., Wick, R. R.,…Holt, K. E. (2025). A genome-wide One Health study of Klebsiella pneumoniae in Norway reveals overlapping populations but few recent transmission events across reservoirs. *Genome Med* , *17* (1), 42. https://doi.org/10.1186/s13073-025-01466-0

Heugens, E. H. W., Hendriks, A. J., Dekker, T., Straalen, N. M. v., & Admiraal, W. (2001). A Review of the Effects of Multiple Stressors on Aquatic Organisms and Analysis of Uncertainty Factors for Use in Risk Assessment. *Critical Reviews in Toxicology*, *31*(3), 247–284. https://doi.org/10.1080/20014091111695

Hevrøy, E. M., Hunskår, C., de Gelder, S., Shimizu, M., Waagbø, R., Breck, O., Takle, H., Susort, S., & Hansen, T. (2013). GH–IGF system regulation of attenuated muscle growth and lipolysis in Atlantic salmon reared at elevated sea temperatures. *Journal of Comparative Physiology B*, *183*, 243–259.

Hevrøy, E. M., Waagbø, R., Torstensen, B. E., Takle, H., Stubhaug, I., Jørgensen, S. M., Torgersen, T., Tvenning, L., Susort, S., Breck, O., & Hansen, T. (2012). Ghrelin is involved in voluntary anorexia in Atlantic salmon raised at elevated sea temperatures. *General and Comparative Endocrinology*, *175*, 118–134.

Hickey, M. E., & Lee, J.-L. (2018). A comprehensive review of Vibrio (Listonella) anguillarum: ecology, pathology and prevention. *Reviews in Aquaculture* , *10* (3), 585–610. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/raq.12188

Hjortaas, M. J., Jensen, B. B., Taksdal, T., Olsen, A. B., Lillehaug, A., Trettenes, E., & Sindre, H. (2016). Genetic characterization of salmonid alphavirus in Norway. *J Fish Dis*, *39*(2), 249–257. https://doi.org/10.1111/jfd.12353

Hjøllo, S. S., Aarflot, J. M., Cannaby, H. A., & Skogen, M. D. (2025). Investigating cumulative impacts: coastal primary production in a warmer, darker, and nutrient-enriched future. *Aquaculture Environment Interactions*, *17*, 235–250. https://doi.org/10.3354/aei00506

Hobday, A. J., Alexander, L. V., Perkins, S. E., Smale, D. A., Straub, S. C., Oliver, E. C. J., Benthuysen, J. A., Burrows, M. T., Donat, M. G., Feng, M., Holbrook, N. J., Moore, P. J., Scannell, H. A., Sen Gupta, A., & Wernberg, T. (2016). A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Progress in Oceanography*, *141*, 227–238. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.12.014

Hoegh-Guldberg, O., & Bruno, J. F. (2010). The Impact of Climate Change on the World's Marine Ecosystems. *Science*, *328*(5985), 1523–1528. https://doi.org/10.1126/science.1189930

Holmer, M. (1999). The Effect of Oxygen Depletion on Anaerobic Organic Matter Degradation in Marine Sediments. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *48*(3), 383–390. https://doi.org/https://doi.org/10.1006/ecss.1998.0424

Holmstrup, M., Bindesbøl, A.-M., Oostingh, G. J., Duschl, A., Scheil, V., Köhler, H.-R., Loureiro, S., Soares, A. M. V. M., Ferreira, A. L. G., Kienle, C., Gerhardt, A., Laskowski, R., Kramarz, P. E., Bayley, M., Svendsen, C., & Spurgeon, D. J. (2010). Interactions between effects of environmental chemicals and natural stressors: A review. *Science of The Total Environment*, *408*(18), 3746–3762. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.10.067

Hurrell, J. W., Kushnir, Y., Ottersen, G., & Visbeck, M. H. (2003). An overview of the North Atlantic Oscillation. In J. W. Hurrell, Y. Kushnir, G. Ottersen, & M. H. Visbeck (Eds.), *The North Atlantic Oscillation: climate significance and environmental impact* (Vol. 134, pp. 1–35). American Geophysical Union.

Husa, V., Sjøtun, K., Brattenborg, N., & Eiliv Lein, T. (2008). Changes of macroalgal biodiversity in sublittoral sites in southwest Norway: impact of an introduced species or higher temperature? *Marine Biology Research*, *4*(6), 414–428. https://doi.org/10.1080/17451000802232874

Huserbråten, M. B. O., & Johnsen, I. A. (2022). Seasonal temperature regulates network connectivity of salmon louse. *ICES Journal of Marine Science*, *79*(4), 1075–1082. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsac024

Hvas, M. (2022). Swimming energetics of Atlantic salmon in relation to extended fasting at different temperatures. *Conservation Physiology*, *10*, coac037.

Hvas, M., & Bui, S. (2022). Energetic costs of ectoparasite infection in Atlantic salmon. *J. Exp. Biol.*, jeb243300.

Hvas, M., Folkedal, O., Imsland, A., & Oppedal, F. (2017). The effect of thermal acclimation on aerobic scope and critical swimming speed in Atlantic salmon Salmo salar. *J. Exp. Biol.*, *220*(2757), 2764.

Hvas, M., Karlsbakk, E., Mæhle, S., Wright, D., & Oppedal, F. (2017). The gill parasite Paramoeba perurans compromises aerobic scope, swimming capacity and ion balance in Atlantic salmon. *Conservation Physiology*, *5*, cox066.

Hvas, M., Morin, A., & Hansen, T. J. (2026). Triploid Atlantic salmon are physiologically disadvantaged at larger body sizes. *Scientific Reports*, *16*, 770.

Hvas, M., Morin, A., Johansen, I. B., & Vågseth, T. (2025). Acute stress-induced mortality in big Atlantic salmon at high temperatures is associated with insufficient oxygen uptake capacity. *J. Therm. Biol.*, *132*, 104231.

Håkonsholm, F., Hetland, M. A. K., Löhr, I. H., Lunestad, B. T., & Marathe, N. P. (2023). Co-localization of clinically relevant antibiotic- and heavy metal resistance genes on plasmids in Klebsiella pneumoniae from marine bivalves. *MicrobiologyOpen*, *12*(4), e1368. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/mbo3.1368

Ignatz, E., Sandrelli, R., Vadboncoeur, E., Zanuzzo, G. S., Perry, G. M. L., Rise, M. L., & Gamperl, A. K. (2023). The Atlantic salmon's (Salmo salar) incremental thermal maximum is a more relevant and sensitive indicator of family-based differences in upper temperature tolerance than its critical thermal maximum. *Aquaculture*, *574*, 739628.

Islam, M. J., Kunzmann, A., & Slater, M. J. (2022). Responses of aquaculture fish to climate change-induced extreme temperatures: A review. *Journal of the World Aquaculture Society*, *53*(2), 314–366.

https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jwas.12853

Jarungsriapisit, J., Nuñez-Ortiz, N., Nordbø, J., Moore, L. J., Mæhle, S., & Patel, S. (2020). The effect of temperature on the survival of salmonid alphavirus analysed using in vitro and in vivo methods. *Aquaculture* , *516* , 734647. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734647

Jensen, O. T., Dempster, T., Thorstad, E. B., Uglem, I., & Fredheim, A. (2010). Escapes of fishes from Norwegian sea-cage aquaculture: causes, consequences and prevention. *Aquaculture Environment Interactions*, *1*, 71–83.

Jeyachandran, S. (2025). Review on climate change, microbial resilience, and disease risks in global aquaculture systems. *Comp. Immunol. Rep.* , *7* (9), 200240.

Johansen, P. O., Isaksen, T. E., Bye-Ingebrigtsen, E., Haave, M., Dahlgren, T. G., Kvalo, S. E., Greenacre, M., Durand, D., & Rapp, H. T. (2018). Temporal changes in benthic macrofauna on the west coast of Norway resulting from human activities. *Mar Pollut Bull*, *128*, 483–495. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.01.063

Johansson, D., Ruohonen, K., Juell, J.-E., & Oppedal, F. (2009). Swimming depth and thermal history of individual Atlantic salmon (Salmo salar L.) in production cages under different ambient temperature conditions. *Aquaculture*, *290*, 296–303.

Johnsen, B. O., & Jensen, A. J. (1994). The spread of furunculosis in salmonids in Norwegian rivers. *Journal of Fish Biology*, *45*(1), 47–55. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1994.tb01285.x

Johnsen, I. A., Loeng, H., & Myksvoll, M. S. (2024). Coastal alterations influence deep water renewal in Norwegian sill fjords. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *297*. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2023.108604

Jones, S. R. M., & Long, A. (2022). Increased prevalence and severity of Kudoa thyrsites (Cnidaria: Myxosporea) in Atlantic salmon Salmo salar exposed to deeper seawater. *Diseases of Aquatic Organisms*, *152*, 1–7.

Jonsson, B., & Jonsson, N. (2009). A review of the likely effects of climate change on anadromous Atlantic salmon Salmo salar and brown trout Salmo trutta, with particular reference to water temperature and flow. *Journal of Fish Biology* , *75* (10), 2381–2447. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2009.02380.x

Karlsbakk, E. (2015). *Amøbisk gjellesykdom (AGD)* (Fisken & Havet 2015 (særnummer 1 Havforskningsrapporten), Issue.

Karlsbakk, E., Asplin, L., Madhun, A., Patel, S., Sandlund, N., Bang Jensen, B., & Kvamme, B. O. (2015). *Annen smitte* (Fisken og Havet 2015 (særnummer 2 Risikovurdering norsk fiskeoppdrett), Issue.

Karlsen, M., Gjerset, B., Hansen, T., & Rambaut, A. (2014). Multiple introductions of salmonid alphavirus from a wild reservoir have caused independent and self-sustainable epizootics in aquaculture. *J Gen Virol*, *95*(Pt 1), 52–59. https://doi.org/10.1099/vir.0.057455-0

Keeley, N. B., Forrest, B. M., & Macleod, C. K. (2013). Novel observations of benthic enrichment in contrasting flow regimes with implications for marine farm monitoring and management. *Marine*

Pollution Bulletin, *66*(1), 105–116. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.10.024

Kennedy, R. J., & Crozier, W. W. (2010). Evidence of changing migratory patterns of wild Atlantic salmon Salmo salar smolts in the River Bush, Northern Ireland, and possible associations with climate change. *Journal of Fish Biology*, *76*(7), 1786–1805. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2010.02617.x

Killen, S. S., Costa, I., Brown, J. A., & Gamperl, A. K. (2007). Little left in the tank: Metabolic scaling in marine teleosts and its implications for aerobic scope. *Proc. R. Soc.*, *274*, 431–438.

Kleppe, L., Fjelldal, P. G., Andersson, E., Hansen, T., Sanden, M., Bruvik, A., Skaftnesmo, K. O., Furmanek, T., Kjærner-Semb, E., Crespo, D., Flavell, S., Pedersen, A. Ø., Vogelsang, P., Torsvik, A., Kvestad, K. A., Olausson, S., Norberg, B., Schulz, R. W., Bogerd, J.,…Wargelius, A. (2022). Full production cycle performance of gene-edited, sterile Atlantic salmon - growth, smoltification, welfare indicators and fillet composition. *Aquaculture*, *560*, 738456. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738456

Knysh, K. M., Courtenay, S. C., Grove, C. M., & van den Heuvel, M. R. (2021). The Differential Effects of Salinity Level on Chlorpyrifos and Imidacloprid Toxicity to an Estuarine Amphipod. *Bull Environ Contam Toxicol*, *106*(5), 753–758. https://doi.org/10.1007/s00128-021-03157-z

Korajkic, A., Wanjugi, P., Brooks, L., Cao, Y., & Harwood Valerie, J. (2019). Persistence and Decay of Fecal Microbiota in Aquatic Habitats. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, *83*(4), 10.1128/mmbr.00005–00019. https://doi.org/10.1128/mmbr.00005-19

Kovach, R. P., Joyce, J. E., Echave, J. D., Lindberg, M. S., & Tallmon, D. A. (2013). Earlier Migration Timing, Decreasing Phenotypic Variation, and Biocomplexity in Multiple Salmonid Species. *PLoS One* , *8* (1), e53807. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0053807

Kullgren, A., Jutfelt, F., Fontanillas, R., Sundell, K., Samuelsson, L., Wiklander, K., Kling, P., Koppe, W., Larson, D. G. J., & Björnsson, B. T. (2013). The impact of temperature on the metabolome and endocrine metabolic signals in Atlantic salmon (Salmo salar). *Comp. Biochem. Physiol. A*, *164*, 44–53.

Kutti, T., Legrand, E., Husa, V., Olsen, S. A., Gjelsvik, Ø., Carvajalino-Fernandez, M., & Johnsen, I. A. (2022). Fish farm effluents cause metabolic depression, reducing energy stores and growth in the reef-forming coral Lophelia pertusa. *Aquaculture Environment Interactions*, *14*, 279–293.

Lacroix, G. L. (2013). Population-specific ranges of oceanic migration for adult Atlantic salmon (Salmo salar) documented using pop-up satellite archival tags. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, *70*, 1011–1030.

Lafferty, K. D. (2009). The ecology of climate change and infectious diseases. *Ecology* , *90* (4), 888–900. https://doi.org/https://doi.org/10.1890/08-0079.1

Lai, F., Budaev, S., Hundven, I. K., Balseiro, P., Handeland, S. O., & Rønnestad, I. (2025). Influence of water temperature on feed intake, appetite control, and energy allocation in Atlantic salmon (Salmo salar) post-smolt [Original Research]. *Frontiers in Physiology*, *Volume 16 - 2025*. https://doi.org/10.3389/fphys.2025.1646208

Lalzar, M., Zvi-Kedem, T., Kroin, Y., Martinez, S., Tchernov, D., & Meron, D. (2023). Sediment Microbiota as a Proxy of Environmental Health: Discovering Inter- and Intrakingdom Dynamics along the Eastern Mediterranean Continental Shelf. *Microbiology Spectrum*, *11*(1), e02242–02222.

https://doi.org/10.1128/spectrum.02242-22

Landrigan, P. J., Stegeman, J. J., Fleming, L. E., Allemand, D., Anderson, D. M., Backer, L. C., Brucker-Davis, F., Chevalier, N., Corra, L., Czerucka, D., Bottein, M.-Y. D., Demeneix, B., Depledge, M., Deheyn, D. D., Dorman, C. J., Fénichel, P., Fisher, S., Gaill, F., Galgani, F.,…Rampal, P. (2020). Human Health and Ocean Pollution. *Annals of Global Health*, *86*(1), 151.

Laskowski, R., Bednarska, A. J., Kramarz, P. E., Loureiro, S., Scheil, V., Kudłek, J., & Holmstrup, M. (2010). Interactions between toxic chemicals and natural environmental factors--a meta-analysis and case studies. *Sci Total Environ*, *408*(18), 3763–3774. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.01.043

Layton, K. K. S., Snelgrove, P. V. R., Dempson, J. B., Kess, T., Lehnert, S. J., Bentzen, P., Duffy, S. J., Messmer, A. M., Stanley, R. R. E., DiBacco, C., Salisbury, S. J., Ruzzante, D. E., Nugent, C. M., Ferguson, M. M., Leong, J. S., Koop, B. F., & Bradbury, I. R. (2021). Genomic evidence of past and future climate-linked loss in a migratory Arctic fish. *Nature Climate Change*, *11*(2), 158–165. https://doi.org/10.1038/s41558-020-00959-7

Leiva, L., Tremblay, N., Torres, G., Boersma, M., Krone, R., & Giménez, L. (2022). European Lobster Larval Development and Fitness Under a Temperature Gradient and Ocean Acidification. *Front Physiol* , *13* , 809929. https://doi.org/10.3389/fphys.2022.809929

Liland, N. S., Lai, F., Sicuro, A., Azevedo, M. L., Araujo, P., Hagen, C., Sissener, N. H., Soares, F., & Rønnestad, I. (2026). On-growing Atlantic salmon (Salmo salar L.) acclimate behaviourally and physiologically to chronic hypoxia, but exhibit reduced feed intake, growth and lipid retention. *Aquaculture*, *611*.

Lindgren, J. F., Ytreberg, E., Holmqvist, A., Dahlström, M., Dahl, P., Berglin, M., Wrange, A.-L., & Dahlström, M. (2018). Copper release rate needed to inhibit fouling on the west coast of Sweden and control of copper release using zinc oxide. *Biofouling*, *34*(4), 453–463. https://doi.org/10.1080/08927014.2018.1463523

Lunder, T., Evensen, Ø., Holstad, G., & Håstein, T. (1995). 'Winter ulcer' in the Atlantic salmon Salmo salar. Pathological and bacteriological investigations and transmission experiments. *Diseases of Aquatic Organisms*, *23*, 39–49.

Madhun, A. S., Karlsbakk, E., Isachsen, C. H., Omdal, L. M., Eide Sørvik, A. G., Skaala, Ø., Barlaup, B. T., & Glover, K. A. (2015). Potential disease interaction reinforced: double-virus-infected escaped farmed Atlantic salmon, Salmo salar L., recaptured in a nearby river. *J Fish Dis* , *38* (2), 209–219. https://doi.org/10.1111/jfd.12228

Madhun, A. S., Karlsbakk, E., Skaala, Ø., Solberg, M. F., Wennevik, V., Harvey, A., Meier, S., Fjeldheim, P. T., Andersen, K. C., & Glover, K. A. (2024). Most of the escaped farmed salmon entering a river during a 5-year period were infected with one or more viruses. *J Fish Dis* , *47* (7), e13950. https://doi.org/10.1111/jfd.13950

Madhun, A. S., Wennevik, V., Skilbrei, O. T., Karlsbakk, E., Skaala, Ø., Fiksdal, I. U., Meier, S., Tang, Y., & Glover, K. A. (2017). The ecological profile of Atlantic salmon escapees entering a river throughout an entire season: diverse in escape history and genetic background, but frequently virus-infected. *ICES Journal of Marine Science*, *74*(5), 1371–1381. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsw243

Mahlum, S., Vollset, K. W., Barlaup, B. T., Skoglund, H., & Velle, G. (2021). Salmon on the lam: Drivers of escaped farmed fish abundance in rivers. *Journal of Applied Ecology*, *58*(3), 550–561. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/1365-2664.13804

Manchanayake, T., Salleh, A., Amal, M. N. A., Yasin, I. S. M., & Zamri-Saad, M. (2023). Pathology and pathogenesis of Vibrio infection in fish: A review. *Aquaculture Reports*, *28*, 101459. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2022.101459

Mantua, N. J., Bell, H., Todgham, A. E., Daniels, M. E., Rinchard, J., Ludwig, J. M., Field, J. C., Lindley, S. T., Rowland, F. E., Richter, C. A., Walters, D., Finney, B., Distajo, H. A. R., Tillitt, D., Honeyfield, D. C., Lipscomb, T., Kwak, K., Kindopp, J., Cocherell, D.,…Johnson, R. C. (2025). Widespread thiamine deficiency in California salmon linked to an anchovy-dominated marine prey base. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *122*(26), e2426011122. https://doi.org/10.1073/pnas.2426011122

Martin, S., & Hall-Spencer, J. M. (2017). Effects of Ocean Warming and Acidification on Rhodolith/Maërl Beds. In R. Riosmena-Rodríguez, W. Nelson, & J. Aguirre (Eds.), *Rhodolith/Maërl Beds: A Global Perspective* (pp. 55–85). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-29315-8_3

Meng, H., Hayashida, H., Norazmi-Lokman, N. J., & Strutton, P. G. (2022). Benefits and detrimental effects of ocean warming for Tasmanian salmon aquaculture. *Cont. Shelf. Res.*, *246*, 104829.

Mill, K., & Kennedy, C. J. (2021). Lethal and sublethal effects of the anti-sea lice formulation Salmosan® on the Pacific spot prawn (Pandalus platyceros). *Journal of the World Aquaculture Society*, *52*(6), 1243–1258. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jwas.12834

Moe, K., Næsje, T. F., Haugen, T. O., Ulvan, E. M., Aronsen, T., Sandnes, T., & Thorstad, E. B. (2016). Area use and movement patterns of wild and escaped farmed Atlantic salmon before and during spawning in a large Norwegian river. *Aquaculture Environment Interactions* , *8* , 77–88.

Moldal, T., Wiik-Nielsen, J., Oliveira, V. H. S., Svendsen, J., Haukaas, A., & Sommerset, I. (2026). *Fiskehelserapporten 2026* (Veterinærinstituttets rapportserie, Issue.

Montory, J. A., Cubillos, V. M., Lee, M. R., Chaparro, O. R., Gebauer, P., Cumillaf, J. P., & Cruces, E. (2023). The interactive effect of anti-sea lice pesticide azamethiphos and temperature on the physiological performance of the filter-feeding bivalve Ostrea chilensis: A non-target species. *Marine Environmental Research*, *183*, 105837. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2022.105837

Muhlfeld, C. C., Cline, T. J., Finstad, A. G., Hessen, D. O., Perrin, S., Thaulow, J., Whited, D., & Vøllestad, L. A. (2024). Climate change vulnerability of Arctic char across Scandinavia. *Global Change Biology*, *30*(7), e17387. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/gcb.17387

Munro, E. S., & Midtlyng, P. J. (2011). Infectious pancreatic necrosis and associated aquatic birnaviruses. In P. T. K. Woo & D. Bruno (Eds.), *Fish diseases and disorders Vol 3 - Viral, Bacterial and Fungal Infections*. Cabi Publishing.

Myksvoll, M. S., Britt Sandø, A., Tjiputra, J., Samuelsen, A., Çağlar Yumruktepe, V., Li, C., Mousing, E. A., Bettencourt, J. P. H., & Ottersen, G. (2023). Key physical processes and their model representation for projecting climate impacts on subarctic Atlantic net primary production: A synthesis. *Progress in Oceanography* , *217* , 103084. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pocean.2023.103084

Nilsen, R., Serra-Llinares, R. M., Sandvik, A. D., Uglem, I., Tonstad, A., Ambjørndalen, V., Lehmann, G. B., Skår, B., & Karlsen, Ø. (2025). *Lakselusinfestasjon på vill laksefisk våren 2025* (Rapport fra Havforskningen, Issue.

Nordberg, K., Polovodova Asteman, I., Gallagher, T. M., & Robijn, A. (2017). Recent oxygen depletion and benthic faunal change in shallow areas of Sannäs Fjord, Swedish west coast. *Journal of Sea Research*, *127*, 46–62. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seares.2017.02.006

Noyes, P. D., McElwee, M. K., Miller, H. D., Clark, B. W., Van Tiem, L. A., Walcott, K. C., Erwin, K. N., & Levin, E. D. (2009). The toxicology of climate change: Environmental contaminants in a warming world. *Environment International*, *35*(6), 971–986. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envint.2009.02.006

Oidtmann, B., Dixon, P., Way, K., Joiner, C., & Bayley, A. E. (2018). Risk of waterborne virus spread – review of survival of relevant fish and crustacean viruses in the aquatic environment and implications for control measures. *Reviews in Aquaculture*, *10*(3), 641–669. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/raq.12192

Okon, E. M., Oyesiji, A. A., Okeleye, E. D., Kanonuhwa, M., Khalifa, N. E., Eissa, E. H., Mathew, R. T., Eissa, M. E. H., Alqahtani, M. A., & Abdelnour, S. A. (2024). The Escalating threat of climate change-driven diseases in fish: Evidence from a global perspective - A literature review. *Environ Res*, *263*(Pt 3), 120184. https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.120184

Oldham, T., Rodger, H., & Nowak, B. F. (2016). Incidence and distribution of amoebic gill disease (AGD) — An epidemiological review. *Aquaculture* , *457* . https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.02.013

Opdal, A. F., Andersen, T., Hessen, D. O., Lindemann, C., & Aksnes, D. L. (2023). Tracking freshwater browning and coastal water darkening from boreal forests to the Arctic Ocean. *Limnology and Oceanography Letters*, *8*(4), 611–619. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/lol2.10320

Peñaranda, M. M. D., Kannimuthu, D., Roh, H., Morton, H. C., Mæhle, S., Skaftnesmo, K. O., Aarseth, S. V., Berg-Rolness, H. S., Kvamme, B. O., & Grove, S. (2026). A novel method for estimating the time-dependent decay of infectivity of infectious salmon anemia virus (ISAV) in raw seawater. *Aquaculture*, *614*, 743552. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2025.743552

Pettersen, J. P., Gundersen, M. S., & Almaas, E. (2021). Robust bacterial co-occurence community structures are independent of r- and K-selection history. *Scientific Reports*, *11*(1), 23497. https://doi.org/10.1038/s41598-021-03018-z

Pfenning-Butterworth, A., Buckley, L. B., Drake, J. M., Farner, J. E., Farrell, M. J., Gehman, A.-L. M., Mordecai, E. A., Stephens, P. R., Gittleman, J. L., & Davies, T. J. (2024). Interconnecting global threats: climate change, biodiversity loss, and infectious diseases. *The Lancet Planetary Health*, *8*(4), e270–e283. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S2542-5196(24)00021-4

Philip, A. J. P., Fjelldal, P. G., Remø, S., Silva, M., Holme, M.-H., Lock, E.-J., & Waagbo, R. (2023). Dietary zinc, selenium and water temperature during early seawater phase influences the development of vertebral deformities and cataract in adult Atlantic salmon. *Aquaculture*, *572*, 739529. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.739529

Pinon, A., & Vialette, M. (2018). Survival of Viruses in Water. *Intervirology*, *61*(5), 214–222. https://doi.org/10.1159/000484899

Planque, B., Favreau, A., Husson, B., Mousing, E. A., Hansen, C., Broms, C., Lindstrøm, U., & Sivel, E. (2022). Quantification of trophic interactions in the Norwegian Sea pelagic food-web over multiple decades. *ICES Journal of Marine Science*, *79*(6), 1815–1830. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsac111

Poulin, R., Paterson, R. A., Townsend, C. R., Tompkins, D. M., & Kelly, D. W. (2011). Biological invasions and the dynamics of endemic diseases in freshwater ecosystems. *Freshwater Biology*, *56*(4), 676–688. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2010.02425.x

Powell, M. D., Leef, M. J., Roberts, S. D., & Jones, M. A. (2008). Neoparamoebic gill infections: host response and physiology in salmonids. *Journal of Fish Biology*, *73*(9), 2161–2183. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2008.02053.x

Pörtner, H.-O., & Farrel, A. P. (2008). Physiology and climate change. *Science*, *322*, 690–692.

Reid, G. K., Gurney-Smith, H. J., Flaherty, M., Garber, A. F., Forster, I., Brewer-Dalton, K., Knowler, D., Marcogliese, D. J., Chopin, T., Moccia, R. D., Smith, C. T., & De Silva, S. (2019). Climate change and aquaculture: considering adaptation potential. *Aquaculture Environment Interactions*, *11*, 603–624.

Remen, M., Sievers, M., Torgersen, T., & Oppedal, F. (2016). The oxygen threshold for maximal feed intake of Atlantic salmon post-smolts is highly temperature dependent. *Aquaculture*, *464*, 582–592.

Remø, S. C., Hevrøy, E. M., Breck, O., Olsvik, P. A., & Waagbø, R. (2017). Lens metabolomic profiling as a tool to understand cataractogenesis in Atlantic salmon and rainbow trout reared at optimum and high temperature. *PLoS One*, *doi.org/10.1371/journal.pone.0175491*.

Remø, S. C., Hevrøy, E. M., Olsvik, P. A., Fontanillas, R., Breck, O., & Waagbø, R. (2014). Dietary histidine requirement to reduce the risk and severity of cataracts is higher than the requirement for growth in Atlantic salmon smolts, independently of the dietary lipid source. *British Journal of Nutrition*, *111*(10), 1759–1772. https://doi.org/10.1017/S0007114513004418

Reverter, M., Sarter, S., Caruso, D., Avarre, J.-C., Combe, M., Pepey, E., Pouyaud, L., Vega-Heredía, S., de Verdal, H., & Gozlan, R. E. (2020). Aquaculture at the crossroads of global warming and antimicrobial resistance. *Nature Communications*, *11*(1), 1870. https://doi.org/10.1038/s41467-020-15735-6

Rigos, G., Padrós, F., Constenla, M., Jerončić, A., Kogiannou, D., Consuegra, S., Adamek, M., & Mladineo, I. (2026). Global Warming Affects the Pathogenesis of Important Fish Diseases in European Aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, *18*(1), e70112. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/raq.70112

Rimstad, E., Basic, D., Espmark, Å. M., Fraser, T. W. K., Gulla, S., Johansen, J., Mo, T. A., Olesen, I., Olsen, R. E., Bø-Granquist, E. G., Ptochos, S., Sayyari, A., & Ytrehus, B. (2023). *Triploid Atlantic salmon in aquaculture - Consequences for fish health and welfare under farming conditions. Scientific Opinion of the Panel on Animal Health and Welfare.* (VKM Report 22, Issue. N. S. C. f. F. a. E. (VKM).

Roberts, R. J., & Shepherd, C. J. (1974). *Handbook of Trout and Salmon Diseases*. Ltd. Surrey.

Rocker, M. M., Yoshioka, R. M., Johnston, K. E., Record, N. R., Small, H. J., & Groner, M. L. (2026). Salt in the wound: consequences of changing salinities on marine disease. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, *381*(1945). https://doi.org/10.1098/rstb.2024.0324

Rohr, J. R., Dobson, A. P., Johnson, P. T. J., Kilpatrick, A. M., Paull, S. H., Raffel, T. R., Ruiz-Moreno,

D., & Thomas, M. B. (2011). Frontiers in climate change–disease research. *Trends in ecology & evolution*, *26*(6), 270–277. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tree.2011.03.002

Rowley, A. F., Baker-Austin, C., Boerlage, A. S., Caillon, C., Davies, C. E., Duperret, L., Martin, S. A. M., Mitta, G., Pernet, F., Pratoomyot, J., Shields, J. D., Shinn, A. P., Songsungthong, W., Srijuntongsiri, G., Sritunyalucksana, K., Vidal-Dupiol, J., Uren Webster, T. M., Taengchaiyaphum, S., Wongwaradechkul, R., & Coates, C. J. (2024). Diseases of marine fish and shellfish in an age of rapid climate change. *iScience*, *27*(9), 110838. https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.110838

Saksvik, M., Nylund, A., Nilsen, F., & Hodneland, K. (2001). Experimental infection of Atlantic salmon (Salmo salar) with marine Eubothrium sp. (Cestoda: Pseudophyllidea): observations on the life cycle, aspects of development and growth of the parasite. *Folia Parasitol* , *48* (2), 118–126. https://doi.org/10.14411/fp.2001.018

Sambraus, F., Fjelldal, P. G., Remø, S. C., Hevrøy, E. M., Nilsen, T. O., Thorsen, A., Hansen, T. J., & Waagbø, R. (2017). Water temperature and dietary histidine affect cataract formation in Atlantic salmon (Salmo salar L.) diploid and triploid yearling smolt. *Journal of Fish Diseases*, *40*(9), 1195–1212. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jfd.12594

Samsing, F., Oppedal, F., Dalvin, S., Johnsen, I., Vågseth, T., & Dempster, T. (2016). Salmon lice (Lepeophtheirus salmonis) development times, body size, and reproductive outputs follow universal models of temperature dependence. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, *73*(12), 1841–1851. https://doi.org/10.1139/cjfas-2016-0050

Sandlund, N., & Madsen, L. (2025). *Mycobacteriosis in farmed and wild fish*. https://ices-library.figshare.com/articles/report/Mycobacteriosis_in_farmed_and_wild_fish/29314076

Sandvik, A. D., Dalvin, S., Skern-Mauritzen, R., & Skogen, M. D. (2021). The effect of a warmer climate on the salmon lice infection pressure from Norwegian aquaculture. *ICES Journal of Marine Science*, *78*(5), 1849–1859. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsab069

Sandø, A. B., Hjøllo, S. S., Hansen, C., Skogen, M. D., Hordoir, R., & Sundby, S. (2022). *Risikoanalyse for de norske havområdene om direkte og indirekte virkninger av klimaendringer på marine økosystemer under ulike utslippsscenarier* (Rapport fra havforskningen 2022-41, Issue 41).

Sandø, A. B., Hjøllo, S. S., Hansen, C., Skogen, M. D., Hordoir, R., & Sundby, S. (2024). A multi-scenario analysis of climate impacts on plankton and fish stocks in northern seas. *Fish and Fisheries*, *25*(4), 711–732. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/faf.12834

Sandø, A. B., Mousing, E. A., Budgell, W. P., Hjøllo, S. S., Skogen, M. D., & Ådlandsvik, B. (2021). Barents Sea plankton production and controlling factors in a fluctuating climate. *ICES Journal of Marine Science*, *78*(6), 1999–2016.

Scharsack, J. P., & Franke, F. (2022). Temperature effects on teleost immunity in the light of climate change. *Journal of Fish Biology*, *101*(4), 780–796. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jfb.15163

Scholander, P. F., Flagg, W., Walters, V., & Irving, L. (1953). Climatic adaptation in arctic and tropical poikilotherms. *Physiol. Zool.*, *26*, 67–92.

Seo, J. Y., Ha, H. K., Im, J., Hwang, J. H., Choi, S. M., Won, N.-I., & Kim, Y. (2018). Impact of seasonal vertical stratification on the dispersion patterns of dredging plumes off the south coast of Korea. *Marine*

Geology, *395*, 14–21. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.margeo.2017.09.005

Silverman, A. I., & Boehm, A. B. (2021). Systematic Review and Meta-Analysis of the Persistence of Enveloped Viruses in Environmental Waters and Wastewater in the Absence of Disinfectants. *Environ Sci Technol*, *55*(21), 14480–14493. https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03977

Sjøtun, K., Husa, V., Asplin, L., & Sandvik, A. D. (2015). Climatic and environmental factors influencing occurrence and distribution of macroalgae — a fjord gradient revisited. *Marine Ecology Progress Series*, *532*, 73–88.

Skagseth, Ø., Oppedal, F., Søiland, H., & Hvas, M. (2025). Measured oxygen levels in Norwegian waters and implications for future offshore Atlantic salmon aquaculture. *Scientific Reports* , *15* , 29416.

Skern-Mauritzen, R., Sissener, N. H., Sandvik, A. D., Meier, S., Sævik, P. N., Skogen, M. D., Vågseth, T., Dalvin, S., Skern-Mauritzen, M., & Bui, S. (2020). Parasite development affect dispersal dynamics; infectivity, activity and energetic status in cohorts of salmon louse copepodids. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, *530-531*, 151429. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jembe.2020.151429

Skilbrei, O. T., Heino, M., & Svåsand, T. (2015). Using simulated escape events to assess the annual numbers and destinies of escaped farmed Atlantic salmon of different life stages from farm sites in Norway. *ICES Journal of Marine Science*, *72*(2), 670–685. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsu133

Skaala, Ø., Glover, Kevin A., Barlaup, Bjørn T., Svåsand, T., Besnier, F., Hansen, Michael M., & Borgstrøm, R. (2012). Performance of farmed, hybrid, and wild Atlantic salmon (Salmo salar) families in a natural river environment. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, *69*(12), 1994–2006. https://doi.org/10.1139/f2012-118

Skaala, Ø., Harvey, A., Borgstrøm, R., Fjeldheim, P. T., Andersen Fjeldheim, K. C., Winterthun, S., Knutar, S., Wennevik, V., & Glover, K. A. (2025). Migration phenology and population status of Atlantic salmon and sea trout are confounded by stronger environmental changes. *ICES Journal of Marine Science*, *82*(6), fsaf101. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsaf101

Skaala, Ø., Wennevik, V., & Glover, K. (2006). Evidence of temporal genetic change in wild Atlantic salmon, Salmo salar L., populations affected by farm escapees. *ICES Journal of Marine Science*, *63*, 1224–1233.

Solomon, C. T., Jones, S. E., Weidel, B. C., Buffam, I., Fork, M. L., Karlsson, J., Larsen, S., Lennon, J. T., Read, J. S., Sadro, S., & Saros, J. E. (2015). Ecosystem Consequences of Changing Inputs of Terrestrial Dissolved Organic Matter to Lakes: Current Knowledge and Future Challenges. *Ecosystems*, *18*(3), 376–389. https://doi.org/10.1007/s10021-015-9848-y

Song, W., Xiang, X., Wang, J., Radosevich, M., & Lin, Y. (2025). Editorial: Anthropogenic effects on the microbial communities of terrestrial ecosystems [Editorial]. *Frontiers in Microbiology*, *Volume 16 - 2025*. https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1636546

Stehfest, K. M., Carter, C. G., McAllister, J. D., Ross, J. D., & Semmens, J. M. (2017). Response of Atlantic salmon Salmo salar to temperature and dissolved oxygen extremes established using animal-borne environmental sensors. *Sci. Rep.* , *7* , 4545.

Sterud, E., Forseth, T., Ugedal, O., Poppe, T. T., Jørgensen, A., Bruheim, T., Fjeldstad, H. P., & Mo, T. A.

(2007). Severe mortality in wild Atlantic salmon Salmo salar due to proliferative kidney disease (PKD) caused by Tetracapsuloides bryosalmonae (myxozoa). *Dis Aquat Organ* , *77* (3), 191–198. https://doi.org/10.3354/dao01846

Stige, L. C., Vollset, K. W., Diserud, O. H., Karlsen, Ø., Knutsen, Ø., Nilsen, F., Paterson, R. A., Qviller, L., Skardhamar, J., & Lille-Langøy, R. (2025). *Produksjonsområdebasert vurdering av lakselusindusert villfiskdødelighet i 2025* (Rapport fra ekspertgruppe for vurdering av lusepåvirkning, Issue.

Straub, S. C., Wernberg, T., Thomsen, M. S., Moore, P. J., Burrows, M. T., Harvey, B. P., & Smale, D. A. (2019). Resistance, Extinction, and Everything in Between – The Diverse Responses of Seaweeds to Marine Heatwaves [Review]. *Frontiers in Marine Science*, *Volume 6 - 2019*. https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00763

Stuber, K., Burr Sarah, E., Braun, M., Wahli, T., & Frey, J. (2003). Type III Secretion Genes in Aeromonas salmonicida subsp. salmonicida Are Located on a Large Thermolabile Virulence Plasmid. *Journal of Clinical Microbiology*, *41*(8), 3854–3856. https://doi.org/10.1128/jcm.41.8.3854-3856.2003

Staalstrøm, A., Yakushev, E., Berezina, A., Iakubov, S., & Golmen, L. (2025). *Vurdering av oksygentrender i norske farvann* NIVA 8040-2025).

Sunagawa, S., Coelho, L. P., Chaffron, S., Kultima, J. R., Labadie, K., Salazar, G., Djahanschiri, B., Zeller, G., Mende, D. R., Alberti, A., Cornejo-Castillo, F. M., Costea, P. I., Cruaud, C., d'Ovidio, F., Engelen, S., Ferrera, I., Gasol, J. M., Guidi, L., Hildebrand, F.,…Bork, P. (2015). Ocean plankton. Structure and function of the global ocean microbiome. *Science* , *348* (6237), 1261359. https://doi.org/10.1126/science.1261359

Sundt-Hansen, L. E., Hedger, R. D., Ugedal, O., Diserud, O. H., Finstad, A. G., Sauterleute, J. F., Tøfte, L., Alfredsen, K., & Forseth, T. (2018). Modelling climate change effects on Atlantic salmon: Implications for mitigation in regulated rivers. *Science of The Total Environment*, *631-632*, 1005–1017. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.058

Sveen, S., Øverland, H., Karlsbakk, E., & Nylund, A. (2012). Paranucleospora theridion (Microsporidia) infection dynamics in farmed Atlantic salmon Salmo salar put to sea in spring and autumn. *Dis Aquat Organ*, *101*(1), 43–49. https://doi.org/10.3354/dao02464

Sylvester, E. V. A., Wringe, B. F., Duffy, S. J., Hamilton, L. C., Fleming, I. A., & Bradbury, I. R. (2018). Migration effort and wild population size influence the prevalence of hybridization between escaped farmed and wild Atlantic salmon. *Aquaculture Environment Interactions*, *10*, 401–411.

Taylor, S. G. (2008). Climate warming causes phenological shift in Pink Salmon, Oncorhynchus gorbuscha, behavior at Auke Creek, Alaska. *Global Change Biology*, *14*(2), 229–235. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01494.x

Thangal, S. H., Muralisankar, T., Mohan, K., Santhanam, P., & Venmathi Maran, B. A. (2024). Biological and physiological responses of marine crabs to ocean acidification: A review. *Environmental Research*, *248*, 118238. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118238

Thompson, C., Bui, S., Dalvin, S., & Skern-Mauritzen, R. (2023). Disentangling the key drivers of salmon louse Lepeophtheirus salmonis fecundity using multiyear field samples. *Aquaculture Environment Interactions*, *15*, 161–178.

Thomsson, K. A., Sveen, L., Benktander, J., Dagnachew, B. S., Quintana-Hayashi, M. P., Johansen, L.-H., Breiland, M. W., Jacq, C., Ytteborg, E., & Linden, S. K. (2025). In Atlantic salmon skin infested with salmon lice, elevated seawater temperatures change gene expression and mucus glycosylation, which promotes pathogen binding. *Fish & Shellfish Immunology*, *165*, 110557. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fsi.2025.110557

Thorstad, E. B., Bliss, D., Breau, C., Damon-Randall, K., Sundt-Hansen, L. E., Hatfield, E. M. C., Horsburgh, G., Hansen, H., Maoiléidigh, N. Ó., Sheehan, T., & Sutton, S. G. (2021). Atlantic salmon in a rapidly changing environment—Facing the challenges of reduced marine survival and climate change. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, *31*(9), 2654–2665. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/aqc.3624

Thorvaldsen, T., Holmen, M., & Moe, H. K. (2015). The escape of fish from Norwegian fish farms: Causes, risks and the influence of organisational aspects. *Marine Policy*, *55*, 33–38.

Tomamichel, M. M., Lowe, K. I., Arnold, K. M. H., Frischer, M. E., Irwin, B. J., Osenberg, C. W., Hall, R. J., & Byers, J. E. (2025). Warmer Is Deadlier: A Meta-Analysis Reveals Increasing Temperatures Accentuate Disease Effects on Fisheries Hosts. *Ecology Letters*, *28*(7), e70156. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/ele.70156

Tu, H. T., Silvestre, F., Meulder, B. D., Thome, J.-P., Phuong, N. T., & Kestemont, P. (2012). Combined effects of deltamethrin, temperature and salinity on oxidative stress biomarkers and acetylcholinesterase activity in the black tiger shrimp (Penaeus monodon). *Chemosphere*, *86*(1), 83–91. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.09.022

Tveito, O. E. (2021). *Norwegian standard climate normals 1991–2020 - the methodological approach* (MET report, Issue 5).

van Bavel, B., Berrang-Ford, L., Moon, K., Gudda, F., Thornton, A. J., Robinson, R. F. S., & King, R. (2024). Intersections between climate change and antimicrobial resistance: a systematic scoping review. *The Lancet Planetary Health*, *8*(12), e1118–e1128. https://doi.org/10.1016/S2542-5196(24)00273-0

Vikeså, V., Nankervis, L., & Hevrøy, E. M. (2017). Appetite, metabolism and growth regulation in Atlantic salmon (Salmo salar L.) exposed to hypoxia at elevated seawater temperature. *Aquac Res*, *48*, 4068–4101.

VKM. (2014). *Panel on Animal Health and Welfare: Risk assesment of amoebic gill disease* (VKM Report 2014:11, Issue.

VKM. (2020). *Assessment of the risk to Norwegian biodiversity and aquaculture from pink salmon (Oncorhynchus gorbuscha). Scientific Opinion of the Panel on Alien Organisms and Trade in Endangered Species (CITES)* (VKM report 2020:01, Issue. N. S. C. f. F. a. E. (VKM).

Vollset, K. W., Urdal, K., Utne, K., Thorstad, E. B., Sægrov, H., Raunsgard, A., Skagseth, Ø., Lennox, R. J., Østborg, G. M., Ugedal, O., Jensen, A. J., Bolstad, G. H., & Fiske, P. (2022). Ecological regime shift in the Northeast Atlantic Ocean revealed from the unprecedented reduction in marine growth of Atlantic salmon. *Science Advances* , *8* (9), eabk2542. https://doi.org/10.1126/sciadv.abk2542

VRL. (2021). *Vitenskapelig råd for lakseforvaltning. Status for norske laksebestander i 2021* (Rapport

fra Vitenskapelig råd for lakseforvaltning nr 16, Issue.

VRL. (2025). *Vitenskapelig råd for lakseforvaltning. Status for norske laksebestander i 2025* (Rapport fra Vitenskapelig råd for lakseforvaltning, Issue.

Wacker, S., Aronsen, T., Karlsson, S., Ugedal, O., Diserud, O. H., Ulvan, E. M., Hindar, K., & Næsje, T. F. (2021). Selection against individuals from genetic introgression of escaped farmed salmon in a natural population of Atlantic salmon. *Evol Appl*, *14*(5), 1450–1460. https://doi.org/10.1111/eva.13213

Wade, N. M., Clark, T. D., Maynard, B. T., Atherton, S., Wilkinson, R. J., Smullen, R. P., & Taylor, R. S. (2019). Effects of an unprecedented summer heatwave on the growth performance, flesh colour and plasma biochemistry of marine cage-farmed Atlantic salmon (Salmo salar). *J. Therm. Biol.*, *80*, 64–74.

Walther, G. R., Roques, A., Hulme, P. E., Sykes, M. T., Pysek, P., Kühn, I., Zobel, M., Bacher, S., Botta-Dukát, Z., Bugmann, H., Czúcz, B., Dauber, J., Hickler, T., Jarosík, V., Kenis, M., Klotz, S., Minchin, D., Moora, M., Nentwig, W.,…Settele, J. (2009). Alien species in a warmer world: risks and opportunities. *Trends in ecology & evolution*, *24*(12), 686–693. https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.06.008

Wernberg, T., Thomsen, M. S., Burrows, M. T., Filbee-Dexter, K., Hobday, A. J., Holbrook, N. J., Montie, S., Moore, P. J., Oliver, E. C. J., Sen Gupta, A., Smale, D. A., & Smith, K. (2025). Marine heatwaves as hot spots of climate change and impacts on biodiversity and ecosystem services. *Nature Reviews Biodiversity*, *1*(7), 461–479. https://doi.org/10.1038/s44358-025-00058-5

Whitney, J. E., Al - Chokhachy, R., Bunnell, D. B., Caldwell, C. A., Cooke, S. J., Eliason, E. J., Rogers, M., Lynch, A. J., & Paukert, C. P. (2016). Physiological Basis of Climate Change Impacts on North American Inland Fishes. *Fisheries*, *41*(7), 332–345. https://doi.org/10.1080/03632415.2016.1186656

Wilson, S. M., Moore, J. W., Ward, E. J., Kinsel, C. W., Anderson, J. H., Buehrens, T. W., Carr-Harris, C. N., Cochran, P. C., Davies, T. D., Downen, M. R., Godbout, L., Lisi, P. J., Litz, M. N. C., Patterson, D. A., Selbie, D. T., Sloat, M. R., Suring, E. J., Tattam, I. A., & Wyatt, G. J. (2023). Phenological shifts and mismatch with marine productivity vary among Pacific salmon species and populations. *Nature Ecology & Evolution*, *7*(6), 852–861. https://doi.org/10.1038/s41559-023-02057-1

Wisshak, M., Schönberg, C. H. L., Form, A., & Freiwald, A. (2012). Ocean Acidification Accelerates Reef Bioerosion. *PLoS One*, *7*(9), e45124. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0045124

Waagbø, R., Olsvik, P. A., & Remø, S. C. (2020). Nutritional and Metabolic Disorders. In P. T. K. Woo & G. K. Iwama (Eds.), *Climate Change and Non-infectious Fish Disorders*.

Waagbø, R., Trösse, C., Koppe, W., Fontanillas, R., & Breck, O. (2010). Dietary histidine supplementation prevents cataract development in adult Atlantic salmon, Salmo salar L., in seawater. *British Journal of Nutrition*, *104*, 1460–1470.

Yin, P., Saito, T., Fjelldal, P. G., Björnsson, B. T., Remø, S. C., Sharma, S., Olsen, R. E., & Hamre, K. (2024). Environmentally driven changes in Atlantic salmon oxidative status interact with physiological performance. *Aquaculture*, *581*.

Zanuzzo, F. S., Beemelmanns, A., Hall, J. R., Rise, M. L., & Gamperl, A. K. (2020). The innate immune response of Atlantic salmon (Salmo salar) is not negatively affected by high temperature and moderate hypoxia. *Frontiers in Immunology*, *11*, 01009.

Årthun, M., Bogstad, B., Daewel, U., Keenlyside, N., Sandø, A. B., Schrum, C., & Ottersen, G. (2018). Climate based multi-year predictions of the barents sea cod stock. *PLoS One*, *13*, 1–13.

HAVFORSKNINGSINSTITUTTET

Postboks 1870 Nordnes
5817 Bergen
Tlf: 55 23 85 00
E-post: post@hi.no
www.hi.no