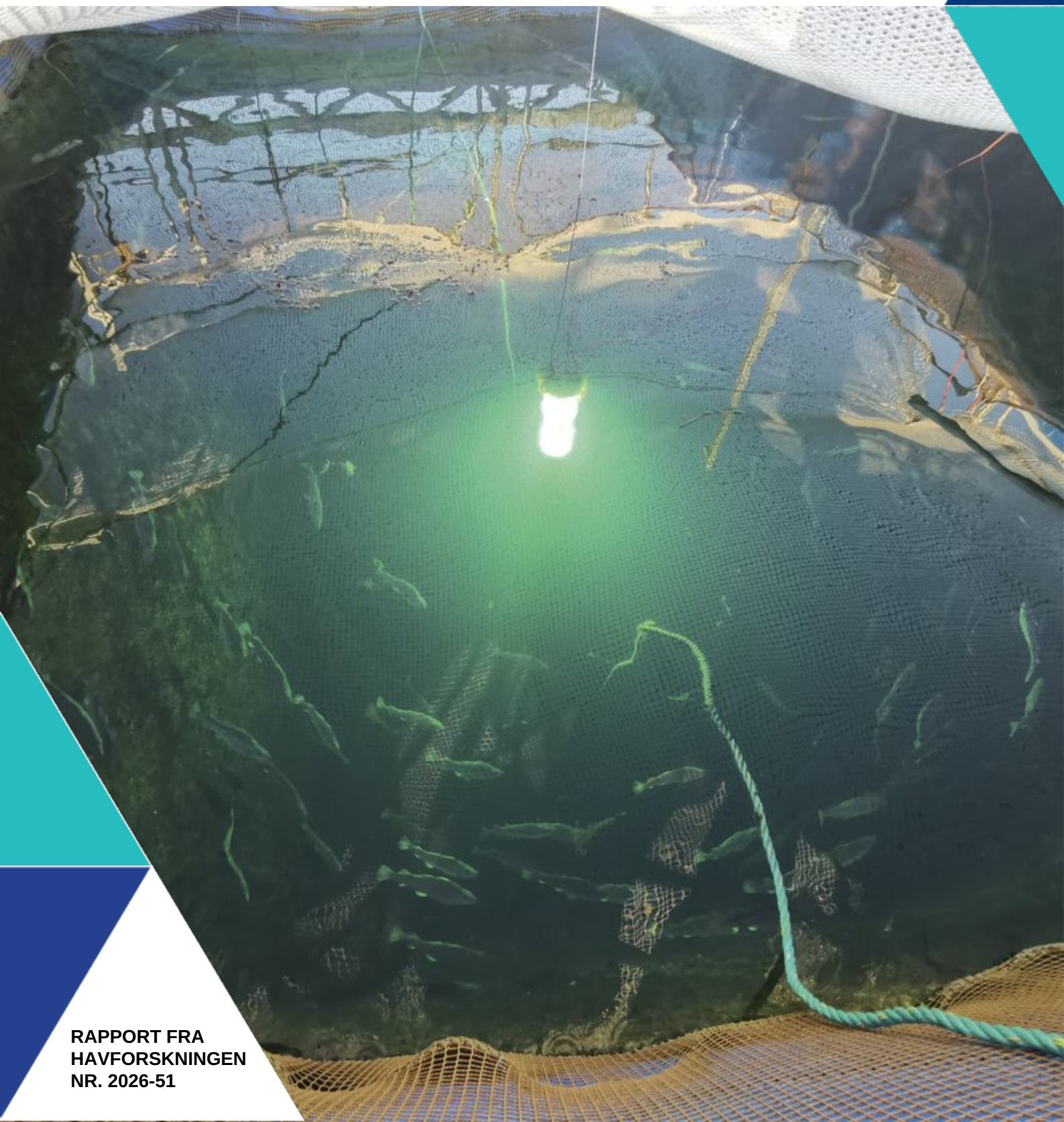
RETT LYSBRUK FOR Å UTSETTE MODNING HOS TORSK OG FOREBYGGE SPREDNING AV EGG FRA GYTING I MERD

Sluttrapport FHF #901815 «MOTOR»



RAPPORT FRA HAVFORSKNINGEN NR. 2026-51

Tittel (norsk og engelsk):

Rett lysbruk for å utsette modning hos torsk og forebygge spredning av egg fra gyting i merd

Correct use of light to delay maturation in cod and prevent the spread of eggs from spawning in cages

Undertittel (norsk og engelsk):

Sluttrapport FHF #901815 «MOTOR»

End report FHF #901815 «MOTOR»

Rapportserie:	År - Nr.:	Dato:
Rapport fra havforskningen	2026-51	20.10.2026

ISSN:1893-4536

Forfatter(e):

Maud Alix, Frode Oppedal, Lena Geitung (HI), Tim Dempter (Deakin University), Velimir Nola, Adele Dahlgren, Thomas Fraser, Audun Østby Pedersen, Rüdiger Schulz, Per Gunnar Fjelldal og Birgitta Norberg (HI)

Forskningsgruppeleder(e): Anna Wargelius (Reproduksjon og utviklingsbiologi) og Lars Helge Stien (Dyrevelferd)
Godkjent av: Forskningsdirektør(er): Geir Lasse Taranger
Programleder(e): Robin Ørnsrud

Distribusjon:

Åpen

Prosjektnr:

15938 og 15194-01

Oppdragsgiver(e):

Fiskeri og Havbruksnæringens Forskningsfond (FHF)

Oppdragsgivers referanse:

901815 og internt prosjekt Torsk (15194-01)

Program:

Fremtidens havbruk

Forskningsgruppe(r):

Reproduksjon og utviklingsbiologi
Dyrevelferd

Antall sider:

50

Samarbeid med

Deakin University

Sammendrag (norsk):

En av de viktigste utfordringene i torskeoppdrett i dag er kjønnsmodning og påfølgende gyting i sjømerder. Dette gir både betydelige produksjonstap, ved at energi omdisponeres fra somatisk vekst til reproduksjon, og skaper risiko for genetisk og økologisk påvirkning på ville torskebestander gjennom utslipp av befruktede egg. Samtidig er kunnskapen om hvordan lysregimer, oppdrettsdyp og fôr påvirker modning, gyting og avkomsoverlevelse hos moderne avlslinjer av torsk fortsatt begrenset. Prosjektet «Modningsfri Torsk i Merd» (MOTOR) har derfor undersøkt hvordan kontinuerlig tilleggslys (LL), naturlig lys (NL), nedsenkede vs. overflatemerder og ulike fôrtype påvirker vekst, kjønnsmodning, gyting, egg- og larveoverlevelse, velferd og parasittstatus hos oppdrettstorsk. Forsøket ble gjennomført over to produksjonsår, med Nofima-linje av torsk i merder som enten lå ved overflaten med kombinasjon av skyggenett eller var nedsenket til 30 m dyp, under NL eller LL. Somatiske indikatorer (vekst, kondisjonsfaktor, HSI) og reproduksjonsparametere (GSI, gonadestadium, oocyttdiameter) ble målt for hunner og hanner, sammen med hormonprofil (11KT, E2), parasittstatus og velferd (tilpasset LAKSVEL-protokollen).

Somatiske data viste gjennomgående at torsk i nedsenkede merder hadde bedre vekstprestasjon, høyere kondisjonsfaktor og HSI enn fisk i overflatemerder, men styrken i effektene varierte mellom første og andre produksjonsår. I begge årene var effekten av nedsenkning tydelig, mens LL ga særlig sterk forbedring i vekst og kondisjon i andre produksjonsår. Overflatemerder under NL hadde lavere vekst og svakere somatiske indikatorer, men dette var mest markert i andre år, da fisken var større og i en fase med høyt reproduksjonsdriv. Når det gjelder kjønnsmodning, modnet fisk i alle grupper i løpet av første produksjonsår, med overveiende respons i NL-gruppene og hovedsakelig hos hanner. LL bidro da til å redusere og forsinke modningsresponsen, men uten fullstendig undertrykking i overflatemerdene. I andre produksjonsår var forskjellene mellom behandlingsgruppene mer markerte: NL-grupper, særlig i overflatemerder, hadde høy grad av modning og gyting, mens LL-grupper i nedsenkede merder viste kraftig dempet eller nesten fraværende reproduktiv utvikling hos både hanner og hunner gjennom hele gyteperioden. Hormonanalyser og gonadeindekser bekreftet at kombinasjonen av moderat kraftig kontinuerlig lys og redusert dagslysintensitet ved nedsenkning gir et tydelig signal som forsinker og begrenser modning, og at denne effekten er særlig sterk i andre produksjonsår når modningspresset normalt er størst.

Gyting og tidlig utvikling fra egg til larver ble undersøkt hos både villtorsk og oppdrettstorsk. Villtorsk hadde gjennomgående høyere befruktningsgrad, bedre embryonal overlevelse og høyere klekkingssuksess enn oppdrettstorsk. Hos oppdrettstorsk ga stamfiskfôr større eggproduksjon og høyere befruktningsprosent enn standard vekstfôr, mens forskjellene i videre utviklingssuksess (embryo–larve) var relativt små og varierte noe mellom gytesesongene. Avkom fra oppdrettstorsk overlevde likevel fram til klekking, noe som viser at egg fra førstegangsgytende oppdrettstorsk ikke kan antas å ha neglisjerbar overlevelse. Sammen med tidligere studier som dokumenterer at befruktede egg fra oppdrettstorsk kan unnslippe merder, nå kjønnsmoden alder og rekruttere til gytefelt, understreker dette at gyting i merd kan gi reell risiko for genetisk påvirkning på villtorsk.

Velferdsvurderingene viste at lys- og nedsenkningsregimene i seg selv ikke ga store velferdsmessige utfordringer verken i første eller andre produksjonsår. De største problemene var deformiteter i rygg og kjeve, som ikke var knyttet til lys eller dyp, samt noe lus, særlig i nedsenkede merder. Parasittnivåene var generelt lave. Samlet sett viser resultatene at det er mulig å kombinere kontinuerlig lys og nedsenkede merder for å redusere kjønnsmodning og samtidig opprettholde god vekst og akseptabel velferd, og at denne strategien har særlig stor effekt i den fasen der torsk normalt har høyest risiko for modning og gyting (andre produksjonsår).

Prosjektet har høy måloppnåelse og gir et konkret kunnskapsgrunnlag for lysstyring og merdkonfigurasjon som kan brukes til å håndtere en av de mest kritiske utfordringene i torskeoppdrett – kjønnsmodning og gyting i sjømerder. Resultatene viser at dagens antakelser om svært lav overlevelse hos egg fra førstegangsgytende oppdrettstorsk må nyanseres, og at effektiv kontroll med modning og gyting er nødvendig for å redusere risikoen for mulig genetisk påvirkning på villtorsk. Videre peker prosjektet på behov for mer forskning på full produksjonssyklus under ulike lysregimer, på avkomskvalitet ved forsinket gyting og på hvordan moderne avlslinjer av torsk tilpasser seg ulike produksjonsmiljøer. Prosjektets nærhet til oppdrettsnæringen gjør at de foreslåtte metodene for lysstyring og nedsenking kan kommersialiseres og implementeres raskt.

Sammendrag (engelsk):

One of the most important challenges in cod aquaculture today is sexual maturation and subsequent spawning in sea cages. This leads to substantial production losses, as energy is reallocated from somatic growth to reproduction, and creates a potential risk of genetic and ecological impact on wild cod populations through the release of fertilized eggs. At the same time, knowledge of how light regimes, farming depth and feed influence maturation, spawning and offspring survival in modern cod breeding lines is still limited. The project “Modningsfri Torsk i Merd” (MOTOR) therefore investigated how continuous light (LL), natural light (NL), submerged vs. surface cages, and different feed types affect growth, sexual maturation, spawning, egg and larval survival, welfare and parasite status in farmed cod.

The experiment was conducted over two production years, using a Nofima cod line in cages that were either at the

surface (combined with shading nets) or submerged to 30 m depth, under NL or LL. Somatic indicators (growth, condition factor, HSI) and reproductive parameters (GSI, gonad stage, oocyte diameter) were measured in both females and males, together with hormone profiles (11KT, E2), parasite status and welfare (adapted LAKSVEL protocol). Somatic data showed that cod in submerged cages had better growth performance, higher condition factor and HSI than fish in surface cages, but the strength of these effects varied between the first and second production year. In both years the effect of submergence was clear, while LL produced particularly strong improvements in growth and condition in the second production year. Surface cages under NL had lower growth and weaker somatic indicators, and this was most pronounced in the second year, when the fish were larger and entering the phase where sexual maturation normally increases . Regarding sexual maturation, fish in all groups matured during the first production year, with the clearest response in NL groups and mainly in males. LL helped to reduce and delay the beginning of the maturation response, but without fully suppressing it in surface cages. In the second production year, differences between treatment groups were more pronounced: NL groups, especially in surface cages, showed a high degree of maturation and spawning, whereas LL groups in submerged cages showed strongly reduced or almost absent reproductive development in both males and females. Hormone analyses and gonad indices confirmed that the combination of continuous light and reduced daylight intensity at depth provides a strong signal that delays and limits maturation, and that this effect is particularly strong in the second production year, when maturation pressure is normally greatest. Spawning and early development from egg to larvae were studied in both wild and farmed cod. Wild cod generally had higher fertilization rates, better embryonic survival and higher hatching success than farmed cod. In farmed cod, broodstock feed resulted in greater egg production and higher fertilization rates than standard growth feed, while differences in subsequent developmental success (embryo–larva) were relatively small and variable. Offspring from farmed cod nevertheless survived through to hatching, showing that eggs from first-time spawning farmed cod cannot be assumed to have negligible survival. Together with previous studies documenting that fertilized eggs from farmed cod can escape cages, reach sexual maturity and recruit to spawning grounds, this underscores that spawning in sea cages poses a real risk of genetic impact on wild cod. Welfare assessments showed that the light and submergence regimes themselves did not cause major welfare challenges in either production year. The main issues were spinal and jaw deformities, which were not linked to light or depth, as well as some lice, particularly in submerged cages. Parasite levels were generally low. Overall, the results show that it is possible to combine continuous light and submerged cages to reduce sexual maturation while maintaining good growth and acceptable welfare, and that this strategy is particularly effective in the phase when cod normally has the highest risk of maturation and spawning (second production year).The project provides a concrete knowledge base for light management and cage configuration that can be used to address one of the most critical challenges in cod aquaculture – sexual maturation and spawning in sea cages. The results show that current assumptions of very low survival in eggs from first-time spawning farmed cod must be nuanced, and that effective control of maturation and spawning is necessary to reduce the risk of possible genetic impact on wild cod. Furthermore, the project highlights the need for more research on full production cycle under different light regimes, offspring quality under delayed spawning, and how modern cod breeding lines adapt to different farming environments. The project’s close collaboration with the aquaculture industry means that the proposed methods for light control and submergence can be commercialized and implemented rapidly.

Innhold

1 Bakgrunn, kunnskapshull og mål 6
1.1 Bakgrunn og kunnskapsstatus 6
1.2 Kunnskapshull og begrunnelse for prosjektet 7
2 Prosjektgjennomføring og metoder 9
3 Effekter av lys, nedsenkning og skyggenett i første produksjonsår hos oppdrettstorsk 12
3.1 Bakgrunn 12
3.2 Oppsett 12
3.2.1 *Miljø* 13
3.2.2 *Lys* 14
3.2.3 *Uttak* 14
3.2.4 *Statistikk* 15
3.3 Resultater 15
3.3.1 *Fiskevekst, kondisjonsfaktor og HSI hos oppdrettstorsk* 15
3.3.2 *Velferd hos torsk* 18
3.3.3 *Kjønnsmodning hos torsk under lysbehandling* 23
3.4 Diskusjon 27
4 Kombinasjon av lys, fôr og nedsenking i andre produksjonsår 28
4.1 Bakgrunn 28
4.2 Oppsett 28
4.2.1 *Miljø* 29
4.2.2 *Lys* 30
4.3 Resultater 31
4.3.1 *Vekst og kondisjonsfaktor hos oppdrettstorsk* 31
4.3.2 *Velferd hos torsk* 33
4.3.3 *Kjønnsmodning hos torsk under lysbehandling* 35
4.4 Diskusjon 36
5 Påvirker fôr avkom hos oppdrettstorsk? 39
5.1 Bakgrunn 39
5.2 Oppsett 39
5.3 Resultater 39
5.4 Diskusjon 40
6 Oppsummering, prosjektets måloppnåelse og fremtidige perspektiver 43
7 Leveranser 45
8 Referanser 46

1 - Bakgrunn, kunnskapshull og mål

1.1 - Bakgrunn og kunnskapsstatus

I 2021 publiserte Havforskningsinstituttet (HI) en sammenstilling av kunnskapsgrunnlaget om hvordan oppdrettstorsk kan påvirke ville torskebestander (Bjørn et al., 2021). Rapporten konkluderer med at beite- og oppvekstområder i nærheten av gytefelt i indre fjord bør gis særlig beskyttelse inntil bedre kunnskap foreligger. Dette understreker behovet for oppdatert kunnskap, både om genetiske og økologiske interaksjoner mellom oppdretts- og villtorsk, og om praktiske metoder og teknologi for å hindre kjønnsmodning og gyting i merd.

Kjønnsmodning er en av hovedutfordringene i kommersiell oppdrett av torsk (*Gadus morhua*), både på grunn av potensiell genetisk påvirkning på villtorsk (Bjørn et al., 2021; Puvanendran et al., 2022) og av hensyn til produksjonsøkonomi. Både hanner og hunner modner vanligvis den andre vinteren i sjø (to år etter klekking), men enkelte hanner kan også modne allerede første vinter i sjø (Braaten, 1984; Davie et al., 2007; Karlsen et al., 1995, 2006; Puvanendran et al., 2022; Svåsand et al., 1996; Taranger et al., 2006).

«Rømming» gjennom utslipp av befruktede egg fra gytende oppdrettstorsk kan påvirke lokale torskebestander (Jorde et al., 2024; Jørstad et al., 2008; Uglem et al., 2012; van der Meeren et al., 2012). Tidligere studier har vist at avkom fra oppdrettstorsk kan rekruttere til gytepopulasjoner og reprodusere i naturen (Jørstad et al., 2008; van der Meeren et al., 2012). Lokale økologiske effekter gjennom slik bestandsrekruttering er også vist for andre arter, for eksempel oppdrett av gilthead seabream (*Sparus aurata*) i Middelhavet (Dimitriou et al., 2007; Somarakis et al., 2013).

Modning og påfølgende gyting i sjømerder representerer i tillegg et betydelig tap for oppdretterne, ettersom energi fra muskulatur og lever omdisponeres til produksjon av egg eller melke i stedet for somatisk vekst. Dette gir dårligere fôrutnyttelse og lengre produksjonstid (Kjesbu et al., 1991; Taranger et al., 2006). Kjønnsmodning kan også gi økt dødelighet, særlig hos hunner som ikke klarer å frigjøre egg og utvikler «gytespreng» (eng. eggbound; (Árnason & Björnsson, 2012; Bogevik et al., 2012)), og sannsynligvis også gjennom redusert immunforsvar (Puvanendran et al., 2022).

Det eksisterer i dag to avlslinjer av oppdrettstorsk: Nofima-stammen, avlet fram ved Nasjonal Avlsstasjon for Torsk i Tromsø, og Havlandet-stammen, avlet i privat regi ved Havlandet Marin Yngel A/S, Florø. Begge er nå kommet til om lag 6.-8. generasjon, og tilgjengelig dokumentasjon viser at disse linjene har bedre tilvekst enn torsken som ble brukt på begynnelsen av 2000-tallet (Puvanendran et al., 2022). Det finnes imidlertid begrenset dokumentasjon på kjønnsmodning hos disse avlslinjene. Data fra 2014 presentert av Nofima viste at 94% av 2-årig fisk var modnende (Puvanendran et al., 2022).

Under forrige «torskeoppdrettsboom» ble det lagt ned betydelig innsats i å utvikle metoder for å undertrykke kjønnsmodning eller redusere overlevelsen til befruktede kjønnsceller som slipper ut fra merdene. Tidligere arbeid har vist at kontinuerlig tilleggslys kan påvirke torskens reproduksjon (Karlsen et al., 2006, 2014; Korsøen et al., 2013; Taranger et al., 2006). I dag er bruk av tilleggslys fra utsett og gjennom første vår/sommer etter klekking fortsatt den eneste tilgjengelige metoden for å stoppe eller forsinke puberteten hos oppdrettstorsk. I innendørsanlegg eller kar med full lyskontroll responderer torsk godt på endringer i fotoperioden, og tilleggslys brukt fra sommersolverv kan stoppe kjønnsmodningen (Davie et al., 2007; De Almeida et al., 2011; Hansen et al., 2001; Karlsen et al., 2006). I overflatemerder har tilsvarende lysbehandlinger ikke klart å stoppe modningen, men har forsinket den med om lag 3–5 måneder (Skulstad et al., 2013; Taranger et al., 2006). Årsakene til dette kan være sammensatte og omfatte værforhold, sesongmessig lys og natt: dag-forhold i lysintensitet, turbiditet og temperatur.

Forsøk med vevskulturer har vist at effekten av å bruke kunstig lys til å undertrykke melatoninproduksjon om natten øker med lysintensiteten (Vera et al., 2010), og at grensen for melatonininhibering avhenger av hvilken dagslysintensitet fisken har opplevd tidligere. Redusert kontrast i lysintensitet mellom dag- og natt kan derfor forbedre effekten av kunstig tilleggslys på kjønnsmodning. Lysintensiteten i sjøvann synker raskt med dyp på grunn av spredning og absorpsjon, påvirket av blant annet saltholdighet, turbiditet og plankton. Det har derfor vært ansett som lovende å kombinere kunstig nattlys med oppdrett i nedsenkede merder (Korsøen et al., 2013), slik at dagslysintensiteten reduseres relativt til nattlyset.

Vill torsk oppholder seg mer enn 90 % av tiden nær havbunnen (Hobson et al., 2007). Dagens praksis med å tvinge torsk mot overflaten ved bruk av overflatebaserte «laksemerder» og overflatefôring er derfor ikke nødvendigvis optimal (Kristiansen et al., 2011; Skulstad et al., 2013). I forsøk med nedsenkede merder på >20 m dyp kombinert med kontinuerlig kunstig lys (LL) ble det funnet forsinket og redusert kjønnsmodning uten tydelig reduksjon i appetitt eller vekst (Korsøen et al., 2013). Selv om modningen ikke ble fullstendig stoppet, var forsinkelsen jevnere enn i tidligere merdforsøk med overflatebaserte merder og tilsvarende lysregimer (Karlsen et al., 2006; Skulstad et al., 2013; Taranger et al., 2006). Gonadeindeks var høyere hos hunntorsk under naturlig lys (NL) enn hos LL-hunner, og LL-fisk produserte færre egg og hadde forsinket gytesesong. Dette tyder på lavere energiinvestering i reproduksjon, mindre gonader og mindre variasjon i levervekt/kondisjon, og dermed bedre fôrutnyttelse. Kjønnsmodning og gyting resulterer i både vekst- og vekttap (Dahle et al., 2003; Karlsen et al., 1995; Korsøen et al., 2013), selv om fisken kan vise kompenserende vekst etterpå (Pedersen & Jobling, 1989), og disse svingningene var mindre uttalt i nedsenket LL-gruppe.

Torsk ser ut til å være mer følsom for forholdet i lysintensitet mellom dag- og natt enn for de absolutte lysnivåene om natten (Vera et al., 2010). Cowan et al. (2011) anbefaler at nattlysnivået ikke bør være lavere enn 31% av dagslysnivået. I Korsøen et al. (2013) var natt/dag-forholdet rundt 36% de første seks månedene, men falt til ca. 15% om vinteren og våren på grunn av økende solhøyde, mindre refleksjon fra overflaten av det innkommende lyset, og dypere lysinntrengning. LL-fisken kan dermed ha opplevd et forsinket «høstsignal» fra februar, som initierte modningsprosessen. Korsøen et al. (2013) konkluderte med at fremtidige forsøk bør forbedre det opplevde nattlyset ved å plassere lyskilder nærmere fisken, bruke flere lyskilder og/eller høyere lysintensitet, og justere dag-/nattforholdet i takt med sesongendringer i naturlig lys (f.eks. plassering av fisken på ulike dyp med sesong). Dagslys kan også dempes med skyggenett (Cowan et al., 2011; Huse & Holm, 1993), men effektiv demping krever ofte nedsenking av merdene til dypere enn 20 m, særlig fra februar og utover (Korsøen et al., 2013). For å gi et stabilt signal om kontinuerlig lys må nattlyset opprettholdes på mer enn 30% av dagslyset til enhver tid. Dette kan oppnås med mange og kraftige lyskilder om natten og/eller ved å redusere dagslysinnstrålingen.

1.2 - Kunnskapshull og begrunnelse for prosjektet

Rapporten til Bjørn et al. (2021) peker på behovet for oppdatert kunnskap om hvilke genetiske og økologiske effekter oppdrettstorsk kan ha på villtorsk, og om hvordan kjønnsmodning og gyting i merd kan unngås. På lengre sikt vil utvikling av steril torsk være et viktig spor, men slike metoder vil kreve betydelig forskningsinnsats over lang tid før de kan kommersialiseres.

Det er blitt hevdet at egg fra førstegangsgytende fisk fôret med moderne vekstfôr har svært lav eller ingen overlevelse dersom de gytes i merd og slippes ut. Det finnes ingen uavhengig dokumentasjon som underbygger dette, og slik dokumentasjon er viktig for risikovurdering. Sommeren 2022 ba Fiskeridirektoratet HI om kunnskapsstøtte for å belyse disse problemstillingene. Dette prosjektet er en sentral del av arbeidet med å fremskaffe denne kunnskapen (særlig AP2).

Som beskrevet ovenfor vil en forsinkelse av kjønnsmodning og gyting med noen måneder innebære at gytingen skjer under andre miljøforhold enn i normal gytesesong. Temperatur er spesielt viktig for gytetidspunkt og eggkvalitet (Alix et al., 2020; Dahlke et al., 2022; Hansen et al., 2012), men det finnes få studier av overlevelse hos egg gytt utenfor normal sesong. Skjærven et al. (2022) har vist at næringssammensetningen i egg fra tidsforskjøvet gyting hos laks skiller seg fra egg gytt til normal tid, noe som kan påvirke levedyktigheten. Ved forsinket gyting hos torsk vil gametogenese, sluttmodning og eventuell gyting skje ved høyere temperatur enn normalt, noe som kan gi dårligere eggkvalitet og lavere overlevelse (Skjærven et al., 2024).

For å undersøke dette er det behov for kontrollerte gyteforsøk, der fisk som viser tegn til kjønnsmodning (påvist ved ultralyd) landsettes og følges gjennom gyting og tidlig utvikling. Ultralyd som metode for å følge kjønnsmodning hos torsk uten avliving ble utviklet allerede på 1990-tallet (Hansen et al., 2001; Karlsen & Holm, 1994). Nyere teknologiske forbedringer har gjort metoden enklere og mer anvendelig, og den brukes nå rutinemessig på flere arter (Hliwa et al., 2014; Ledoré et al., 2021; Næve et al., 2018). I dette prosjektet benyttes ultralyd både i grupper med naturlig fotoperiode og i grupper med kontinuerlig lys, forutsatt at modning faktisk oppstår.

På bakgrunn av dette ble FHF prosjektet «Modningsfri Torsk i Merd» (MOTOR) etablert for å bidra med ny kunnskap og praktiske metoder som kan hindre kjønnsmodning og gyting i merd. Samtidig ble en del av NFD sine midler til HI (prosjekt Torsk, no. 15194-01) benyttet for å utvide forsøksoppsettet sin ramme og svare på flere hypoteser. Prosjektets hovedmål er å utvikle en innovativ, bærekraftig metode for å produsere torsk i merder fram til slaktestørrelse uten kjønnsmodning, med god vekst, normal atferd og velferd. I tillegg ble prosjektet delt i to delmål:

1. Utvikle en protokoll for kontroll av kjønnsmodning ved lysstyring av torsk i merd
2. Fremskaffe dokumentasjon på overlevelse hos egg gytt fra førstegangsgytende oppdrettstorsk, ved å gjennomføre kontrollerte gyteforsøk i kar

Kontroll med kjønnsmodning er avgjørende for at torskeoppdrett skal kunne bli en miljømessig og økonomisk bærekraftig næring. Føre-var-prinsippet har til nå begrenset muligheten for å få tillatelse til sjøbasert oppdrett, blant annet på grunn av risiko for genetisk påvirkning gjennom egg gytt i merd. Vi forventer at kunnskapen fra prosjektet raskt kan tas i bruk i næringen, ved at teknologi for lysstyring og demping standardiseres og optimaliseres på biologiske premisser, slik at fisken effektivt hindres i å bli kjønnsmoden før slaktestørrelse.

Videre vil prosjektet bidra til å avklare om egg fra førstegangsgytende, lysstyrt torsk er levedyktige og kan bidra til genetisk påvirkning på villtorsk. Dette er kunnskap som er avgjørende for hvor det bør gis tillatelser til torskeoppdrett i merd. Flere torskeoppdrettere og den største leverandøren av lysutstyr til torskeoppdrett deltar i prosjektets arbeidsgruppe eller er medlemmer i referansegruppe. Denne nærheten til næringen øker sannsynligheten for at resultatene raskt kan kommersialiseres og implementeres.

2 - Prosjektgjennomføring og metoder

Prosjektets har utnyttet kunnskapen fra tidligere forsøk og pågående torskeproduksjon i merder med ulike lyskonfigurasjoner, samtidig som det ble gjennomført vitenskapelige forsøk med lysintensitet og demping (skyggenett og nedsenkning). Et viktig steg på veien er å måle lyset på en måte som dokumenterer representative lysnivå med fisk til stede. Sammen med kontinuerlig måling av torskens opplevde temperatur og jevnlige uttak av fisk dokumenterte vi utvikling i kjønnsmodning og vekst med de naturlige og kunstige sesongsvingningene i miljøet. Fisk fra avlede oppdrettsstammer ble benyttet for å sikre resultatenes gyldighet. Vitenskapelig arbeidsmetode og dokumentasjon er essensiell for hurtigst mulig å kunne lykkes med innovasjonen.

Prosjektet har undersøkt effektiviteten av lysstyring hos oppdrettstorsk for å undertrykke kjønnsmodning i merd og produsere fisk med god vekst, normal atferd og velferd. I tillegg ble overlevelsen dokumentert hos avkom fra modne oppdrettstorsk som fikk kommersielt vekstfôr sammenlignet med stamfiskfôr.

Prosjektet ble fordelt på tre arbeidspakker (AP) som skulle utnytte kunnskap fra tidligere forsøk og pågående torskeproduksjon i merder med ulike lyskonfigurasjoner, samtidig som det ble gjennomført vitenskapelige forsøk med lysintensitet, lysdemping (skyggenett og nedsenking) og fôrtype (vekstfôr versus stamfiskfôr) for å undersøke effekter på kjønnsmodning hos stamfisk og overlevelse hos avkom. Det ble først gjennomført et småskala merdforsøk der effekten av lysdemping ved nedsenking versus skyggenett i overflaten, kombinert med tilleggslys i første års produksjon av oppdrettstorsk, ble undersøkt. Effekter på måleparametere som tilvekst, kjønnsmodning og velferd hos torsk ble registrert og sammenlignet med naturlig lys (AP1-forsøk 1). Et tilsvarende forsøk ble gjennomført i andre års produksjon av oppdrettstorsk, der fisk ble holdt i nedsenkede og overflatemerder under enten kontinuerlig lys (LL) eller naturlig lys (NL), og fôret med enten vekstfôr eller stamfiskfôr (AP1-forsøk 2). I tillegg ble overlevelse fra egg til larve hos oppdrettstorsk undersøkt under ulike lysregimer og fôrtype (AP2). Prosjektadministrasjon ble lagt til AP3.

Forskningsarbeidet ble utført av prosjektdeltakere fra Havforskningsinstituttet (HI) (faggruppe reproduksjon og utviklingsbiologi, samt dyrevelferd) og Deakin University i Melbourne. Forsøkene ble gjennomført ved HI sin forskningsstasjon i Austevoll, og analyser ble utført ved HI-Austevoll, Bergen og ved Deakin University i Melbourne. Det ble i tillegg etablert en referansegruppe med representanter fra torskeoppdrettere, sjømatnæringen og FHF: Ode v/ Falk Øverås, Norcod AS v/ Julianne Jacobsen, Gunnar Klo AS v/ Beate Solvoll samt observatør fra FHF v/Eirik Ruud Sigstadsø.

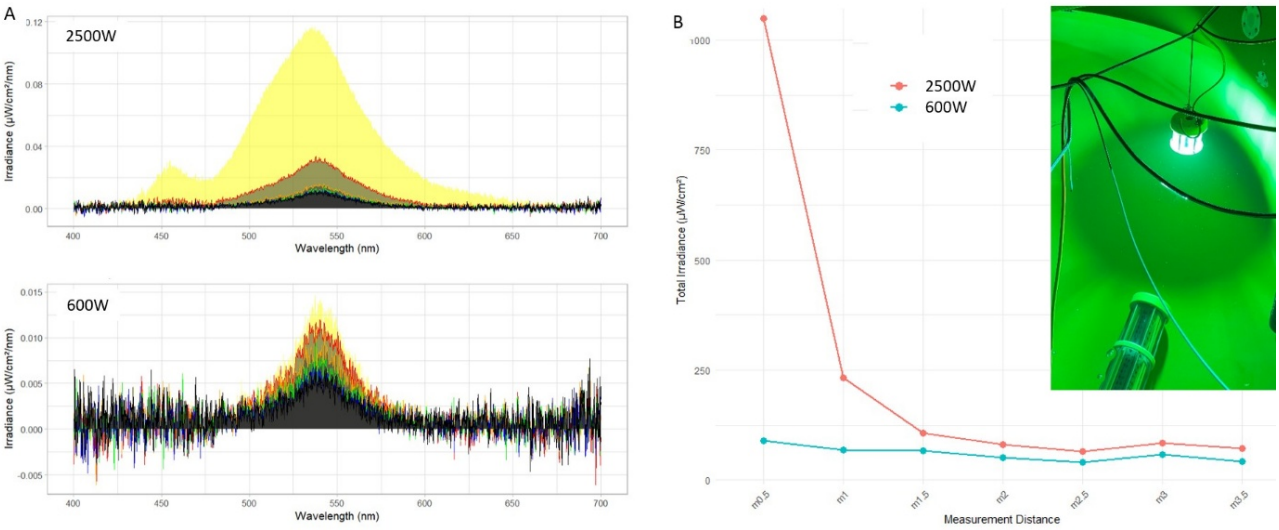
Det var opprinnelig planlagt å gjennomføre ett felles forsøk med alle gruppene fra AP1 frem til slaktestørrelse. Prosjektet har imidlertid vært påvirket av enkelte driftsmessige utfordringer som har hatt konsekvenser for fremdriften. Hovedårsaken var et ILA-utbrudd i nærområdet i 2023/2024, som medførte båndlegging og midlertidig stans i all aktivitet på sjøanlegget ved Forskningsstasjonen Austevoll sommeren 2024. Dette nødvendiggjorde endringer i forsøksoppsettet og en forskyvning av de planlagte aktivitetene. Som følge av dette ble AP1 delt inn i to delprosjekter, AP1-1 og AP1-2.

I AP1-1 ble ettårig torsk fordelt på fire grupper som ble holdt i nedsenkede (37 meter dybde, 5 × 5 × 7 m med tak på 30 m dyp) eller overflate sjømerder (5 m × 5 m × 7 m) med skygenett, under enten naturlig lys (NL) eller kontinuerlig lys (LL) i ni måneder (Figur 3). To lysintensiteter ble benyttet: 2500 W i overflatemerder og 600 W i nedsenkede merder, plassert rundt 2,5 m fra overflaten eller taket i de nedsenkede merdene. Alt lysutstyr ble levert av Biomarine A/S. Appetitt, tilvekst, kjønnsmodning og velferd hos torsken ble fulgt gjennom forsøksperioden og sammenlignet mellom lysbehandlingene og gruppene med naturlig lys. I AP1-2 ble toårig

torsk fordelt på fire grupper som ble holdt i nedsenkede eller overflate sjømerder, under enten naturlig lys (NL) eller kontinuerlig lys uten skyggenett (LL) i ni måneder. I tillegg ble NL fisken i overflaten delt i to og fôret med enten vekstfôr eller stamfiskfôr. De samme parameterne som i AP1-1 ble undersøkt.

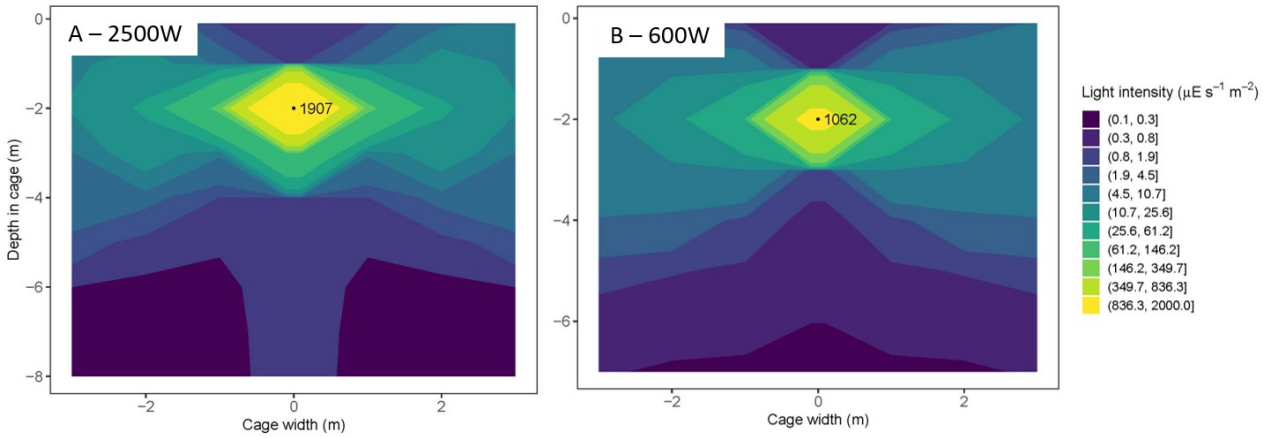
I AP2 ble gyting og overlevelse fra egg til larve hos oppdrettstorsk fra AP1-2 undersøkt. Gytesesong, eggvolum, utviklingssuksess (overlevelse, klekking og deformiteter) hos embryoer samt vekst hos avkommet ble analysert.

Lampene som ble benyttet i AP1 er av typen AquaLux 600W eller 2500W og levert av Biomarine, Surnadal. For å beskrive lyskvaliteten ble fargesammensetningen målt med (FLAME-S Ocean Optics Spectrometer) på ulike avstander og gitt som irradians per bølgelengde og total irradians per lyskilde (Figur 1A) i et kar med sjøvann hvor lysmåler peker horisontalt mot lyskilde (se bilde i Figur 1B). Vi ser at lyset produserer energi hovedsakelig fra 490-590 nm (blå-grønn-gul) og kan ses godt igjen på bildene hvor lyset ser grønt ut. Denne fargen antas å være riktig i forhold til torskens oppfattelse og har minst demping i sjøvann. Det er en kraftig reduksjon av lysintensitet med avstand for begge lyskilder, som følger loven om at lysintensiteten fra en punktkilde avtar med kvadratet av avstanden. Forskjellen i intensitet mellom lampene sees best i Figur 1B, men kan også klart ses i Figur 1A når man tar med at det er ulike skalaer på y-akse.



Figur 1: A) Irradians (µW cm-2 nm-1) gitt per bølgelengde fra 400-700nm for 2500W og 600W lyskilde ved 0,5 m økende avstand mellom lys og lysmåler fra 0,5 til 3,5 m (gul-svart). NB. Ulik skala på vertikal akse. B) Total irradians µW cm-2) per lyskilde ved økende avstand. Bilde av lysoppsett i kar for å måle irradians.

Lysets fordeling rundt lampene ble målt i et grid av 30 punkt målinger med ulik avstand fra lyskilde i hver enkelt merd (Figur 2) med en sfærisk PAR lysmåler av typen 193SA (Spherical Underwater Quantum Sensor, Li-cor, NE, U.S.). Basert på torskens varierende fordeling i merden (observert med kamera og fra overflaten om natten) og lysmålingene (Figur 2) er det antatt at torsken hovedsakelig opplever verdier >10 µE s^{-1} m^{-2} i LL overflate (2500W) og >8 µE s^{-1} m^{-2} i LL nedsenket merder.



Figur 2 : Lysets fordeling rundt 2500W (A) og 600W (B) lyskilde plottet basert på grid av 30 punkt målinger på 0 til 7 m dyp og 0,1/1//2/3 m avstand fra lyskilde i hver enkelt merd.

3 - Effekter av lys, nedsenkning og skyggenett i første produksjonsår hos oppdrettstorsk

3.1 - Bakgrunn

Kjønnsmodning hos torsk i merder er en betydelig produksjonsmessig utfordring og kan samtidig gi miljømessige konsekvenser gjennom mulige genetiske og økologiske interaksjoner med villtorsk. Modning og påfølgende gyting i sjømerder representerer et klart tap for oppdretterne, ettersom energi fra muskulatur og lever omdisponeres til produksjon av egg eller melke i stedet for somatisk vekst. Per i dag, er bruk av tilleggslys fra utsett eller fra midtsommer fortsatt den eneste tilgjengelige metoden for oppdrettere for å stoppe eller forsinke puberteten. I overflatemerder har lysbehandlinger ikke klart å hindre modning, men har forsinket den med om lag 3 til 5 måneder (Skulstad et al., 2013; Taranger et al., 2006). Under forrige torskeoppdrettsboom ble det også beskrevet at en reduksjon av lysintensitetsforskjellen mellom dag og natt kan forbedre effekten av kunstig tilleggslyset mot kjønnsmodning, og at nattlysnivået bør være over 31 % av lysnivået fisken opplever på dagtid (Cowan et al., 2011).

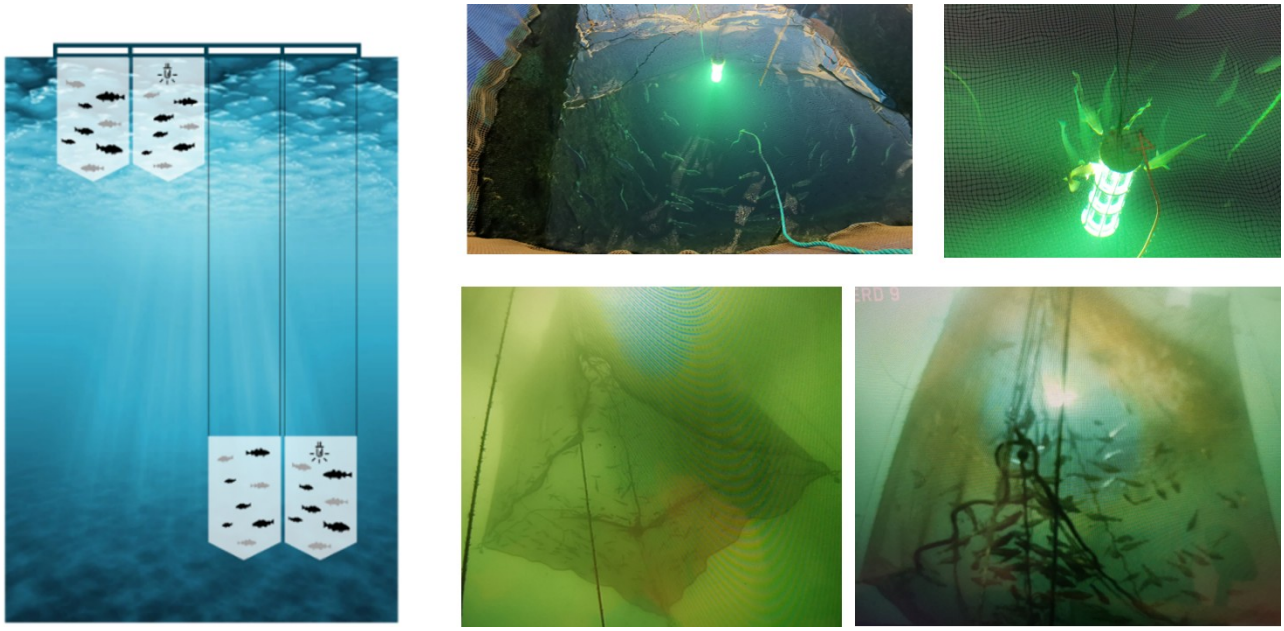
I dette forsøket, var målet å undersøke hvordan demping av naturlige lysforhold med nedsenkning (i) versus skyggenett (ii) kombinert med tilleggslys (LL) med kraftige lamper i overflaten og moderat sterke lamper i dypet påvirker tilvekst, kjønnsmodning og velferd hos torsk i merder i første produksjonsår sammenlignet med naturlig lys (NL).

3.2 - Oppsett

Torskeyngel ble produsert høsten 2022 ved Ode AS fra Nofima-stammen, 7. generasjons avlslinje. Fisken ble oppdrettet ved Austevoll Rensefisk under kontinuerlig lys fra midtsommer eller fortsatt på NL og overført til sjømerder ved Havforskningsinstituttets forskningsstasjon i Austevoll i september 2023 enten inn i NL eller LL gruppe. Totalt 4800 torsk ble fordelt i fire grupper med tre repliserte merder i hver, som følger:

- Overflatemerder, skyggenett og naturlig lys (NL)
- Overflatemerder, skyggenett og kontinuerlig lys (LL, 2500W)
- Nedsenkede merder med naturlig lys
- Nedsenkede merder med kontinuerlig lys (600W)

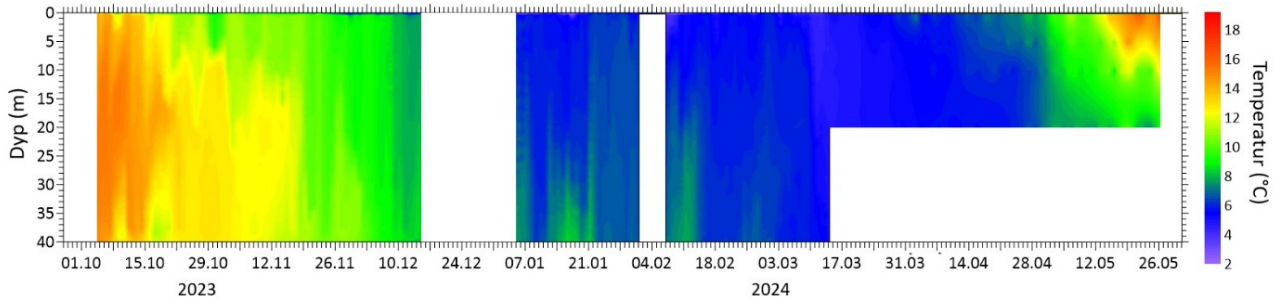
I Figur 3 er gruppeoppsettet skissert, og noen bilder viser øyeblikk hvor merder og fisk kan sees fra overflaten eller med undervannskamera.



Figur 3 : Skjematisk fremstilling av gruppeoppsett (skisse) første produksjonsår og bilder fra LL merder i overflate (høyre oppe) og (ned venstre bilde) NL og LL (nedre, høyre bilde) gruppe nedsenket.

3.2.1 - Miljø

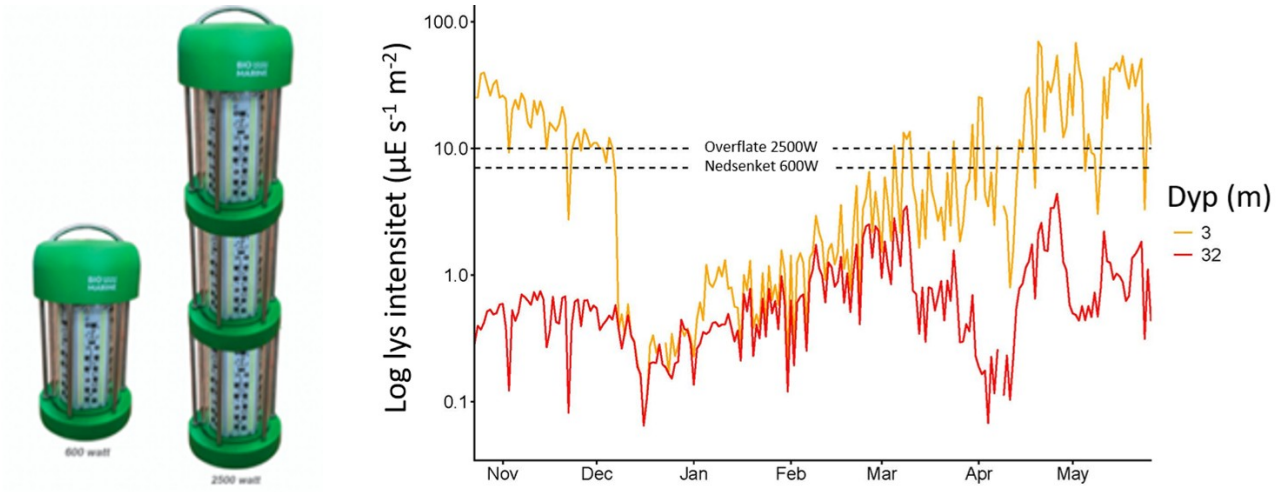
Temperaturen i forsøket fulgte normale sesongmessige svingninger og variasjon med dyp (Figur 4). Etter utsett var det omtrent 14 °C i hele vannsøylen hvoretter overflatetemperaturen sank til omtrent 10 °C fra slutten av oktober, 8 °C i desember og holdt seg stabil på omtrent 6°C frem til våren hvor den steg til 10 og deretter 14 °C i slutten av mai. Den nedsenkete fisken opplevde senere nedgang i temperatur og hadde stort sett 1-4 °C høyere temperatur frem til februar/ mars. Ettersom vi mangler dype data fra midten av mars til avslutning i mai kan vi ikke med sikkerhet si når temperaturen i dypet begynte å øke, men av erfaring så antar vi at den nedsenkete fisken i senvinter- og vårperioden opplevde 1-6 °C lavere temperaturer enn overflatefisken. Oppsummert så opplevde den nedsenkete fisken en høyere døgngradsum enn overflatefisk fra utsett til mars og på våren en lavere temperatur. Det var ikke målt ekstreme temperaturer i perioden som antas å være utfordrende for torsk. Oksygennivået var alltid målt til >85% metning og var ikke utfordrende for torsken. Saltholdigheten i overflaten varierte ned til omtrent 28 ppt, mens den nedsenkete fisken alltid opplevde fullt sjøvann.



Figur 4 : Plott av daglige temperatur målinger utført med profilerende CTD fra 0-40 m til midten av mars og manuelle målinger 0-20 m fra mars til utgangen av mai. Hvite felt indikerer manglende data.

3.2.2 - Lys

De naturlige lysgruppene opplevde sesong- og dag/ natt variasjoner i lysintensitet, mens lysgruppene opplevde konstant lys så sant det naturlige lyset ikke oversteg belysningen som lampene ga (Figur 5). Basert på grid av lysmålinger i LL-merdene sammen med observert fordeling av fiskens avstand til lyset ble det vurdert at torsken normalt opplevde verdier >10 µE s^{-1} m^{-2} i LL overflate (2500W) og >8 µE s^{-1} m^{-2} i LL nedsenkede merder. Det opplevde naturlige lyset ble målt med 2 stk lysmålere (Licor, 193SA probe) som ble satt til å måle hver time og plassert inne i en av NL overflatemerdene (med skyggenetting) på representativt dypt i forhold til fiskens svømmedyp på dagtid (2-4 m dybde) og på 32 m dyp mellom de nedsenkete NL merdene. Målingene forventes å være representative for fiskens lysopplevelse i de ulike gruppene og er gitt i Figur 5. På grunn av driftstekniske utfordringer ble ikke lyset målt fra september/ oktober. Det opplevde lyset i nedsenket LL (600W) gruppe i november/ desember var alltid høyere enn det naturlige nivået på dagtid (32 m i Figur 5) og fisken opplevde aldri en dag/ natt variasjon i lysintensitet. Overflate LL gruppen opplevde dag/ natt variasjon fra oktober og frem til begynnelsen av desember fordi skyggenett ble ødelagt av vind, nedbør og bevegelser i anlegget. Etter installasjon av nye skyggenett i desember ser vi av Figur 5 at det kunstige lyset (2500W) var sterkere enn det naturlige (3 m) frem til mars hvoretter det naturlige lyset var stort sett betydelig sterkere frem til avslutning i slutten av mai.



Figur 5 : Bilde av 600 W (venstre) og 2500 W (høyre) lamper benyttet. Plott viser gjennomsnittlig lysintensitet på dagtid (10:00-15:00) gjennom forsøksperiode fra november 2023 til juni 2024 målt på 3 m dyp i NL merd i overflaten (gul linje) og på 32 m dyp i nedsenket NL merd (rød linje). Minimum lysintensitet 1-3 m unna lyskilde for LL merder er gitt som stiplete linjer.

3.2.3 - Uttak

Fra alle merder ble fisk tatt ut hver sjette uke gjennom forsøksperioden. De nedsenkete merdene ble tatt opp over 1-2 døgn gjennom flere trinn for å unngå trykkreduksjoner på >40% for å hindre at svømmeblærene utvidet seg for mye og sprakk. Vekt, lengde, ultralyd, parasitter, gonader, lever, kjønn og sløyd vekt ble registrert for å undersøke og sammenligne tilvekst, kondisjon, kjønnsmodning og velferd (inkludert parasitter og deformiteter) mellom gruppene. Utvalgte fisk ble i tillegg tatt prøver for blod og hjerne i utvalgte fisk. For å følge kjønnsmodning, ble det brukt flere indikatorer:

- Makroskopisk vurdering av kjønnsmodning (Alix et al., 2024)
- Gonadosomatisk indeks (GSI) som estimerer fiskens modningsstadium og tilsvarer vekt av gonader i prosent av vekt hos fisken
- Mikroskopisk vurdering av kjønnsmodning: oocyttdiameter som informere om modningsstatus og histologiske bilder hos hanner
- Kjønnshormoner i plasma slik som østradiol-17β (E2) hos hunner og 11-ketotestosteron (11-KT) hos hanner

3.2.4 - Statistikk

Den statistiske analysen og datavisualiseringene ble utført i R (versjon 4.3.2; R Core Team 2023) inkludert packages 'dplyr', 'glmmTMB', 'DHARMa', 'car', and 'emmeans'. Analysen inkluderte følgende variabler: GSI, HSI, Vekt, K, *Caligus* samt 11-KT for hanner, og E2, og oocyttdiameter for hunner. For prøvetakingene (desember til mai) ble reproduksjonsparametere (GSI) samt somatiske vekstindikatorer (vekt, K, HSI) analysert separat for hunner og hanner i de ulike behandlingsgruppene. Kjønnsdelt analyse ble valgt fordi hunner og hanner skiller seg i energiinvestering og vekstdynamikk under reproduksjon. Det første prøvetidspunktet (oktober) ble utelatt fra de statistiske analysene av reproduksjonsparametere, ettersom dette fungerte som en baseline før behandlingsregimene ble implementert. Siden disse dataseriene hadde tydelige tidsmessige effekter (variasjon mellom prøvetakningene) og ikke oppfylte kravene til normalfordeling, ble det benyttet en generalisert lineær blandet modell (GLMM). Vi tilpasset en serie modeller for å teste forskjeller i de ovennevnte variablene mellom de fire behandlingene (behandling: overflate NL, overflate LL, nedsenket NL, nedsenket LL) på tvers av de fire prøvetidspunktene (desember, februar, april og mai). På grunn av utfordringer med sammenligning mellom alle prøvetidspunkter ble kun desember og mai inkludert i modellene. Alle «Taperfisk»-fisk ble ekskludert fra analysen basert på åpenbart avvikende utseende og størrelse. Hanner og hunner ble modellert separat (med unntak av i *Caligus*-modellen). Parameterne ble modellert som funksjoner av behandling og prøvetakingsdato som kategoriske variabler (f.eks. Fish weight ~ Treatment × Sampling + (1 | Cage)) der «merd» (cage) ble inkludert som en tilfeldig effekt. GSI-dataene ble omkodet til en binær modningsvariabel, der fisk i kategoriene «Gytende» og «Modnende» ble gruppert separat fra fisk klassifisert som «Umoden», for å tilpasse modellen til datastrukturen. Modelltilpasningen ble vurdert ved hjelp av simulerte residualplott. Alle ledd i modell ble signifikans-testet ved hjelp av en ANOVA-funksjon. Dersom et ledd var signifikant, ble det gjennomført en post-hoc-test av parvise forskjeller ($\alpha = 0.05$).

3.3 - Resultater

3.3.1 - Fiskevekst, kondisjonsfaktor og HSI hos oppdrettstorsk

Ved utsett i sjømerder i september 2023 var gjennomsnittsvekten 339 g (Figur 6 a, b). NL-fisken vokste videre til 1,3 kg (NL overflate) og 1,5 kg (NL nedsenket) i gjennomsnitt ved avslutningen i mai. LL-fiskene nådde 1,4 og 1,7 kg i mai i overflate og nedsenkede merder. Kondisjonsfaktoren økte også hos både hunner og hanner gjennom forsøksperioden, fra gjennomsnittlig 1,08 til 1,30 i nedsenkede merder og 1,22 og 1,23 i overflatemerder med NL og LL, henholdsvis (Figur 6 c, d). HSI økte fra 7,9 % i september til 13,0 og 13,1 i nedsenkede merder LL og NL, og 11,1 og 11,4 i overflatemerder med LL og NL (Figur 6 e, f). Det var signifikante forskjeller mellom gruppene for alle indikatorer ($p<0,001$) og de største fiskene med høyest kondisjonsfaktor og HSI befant seg i nedsenkede merder.

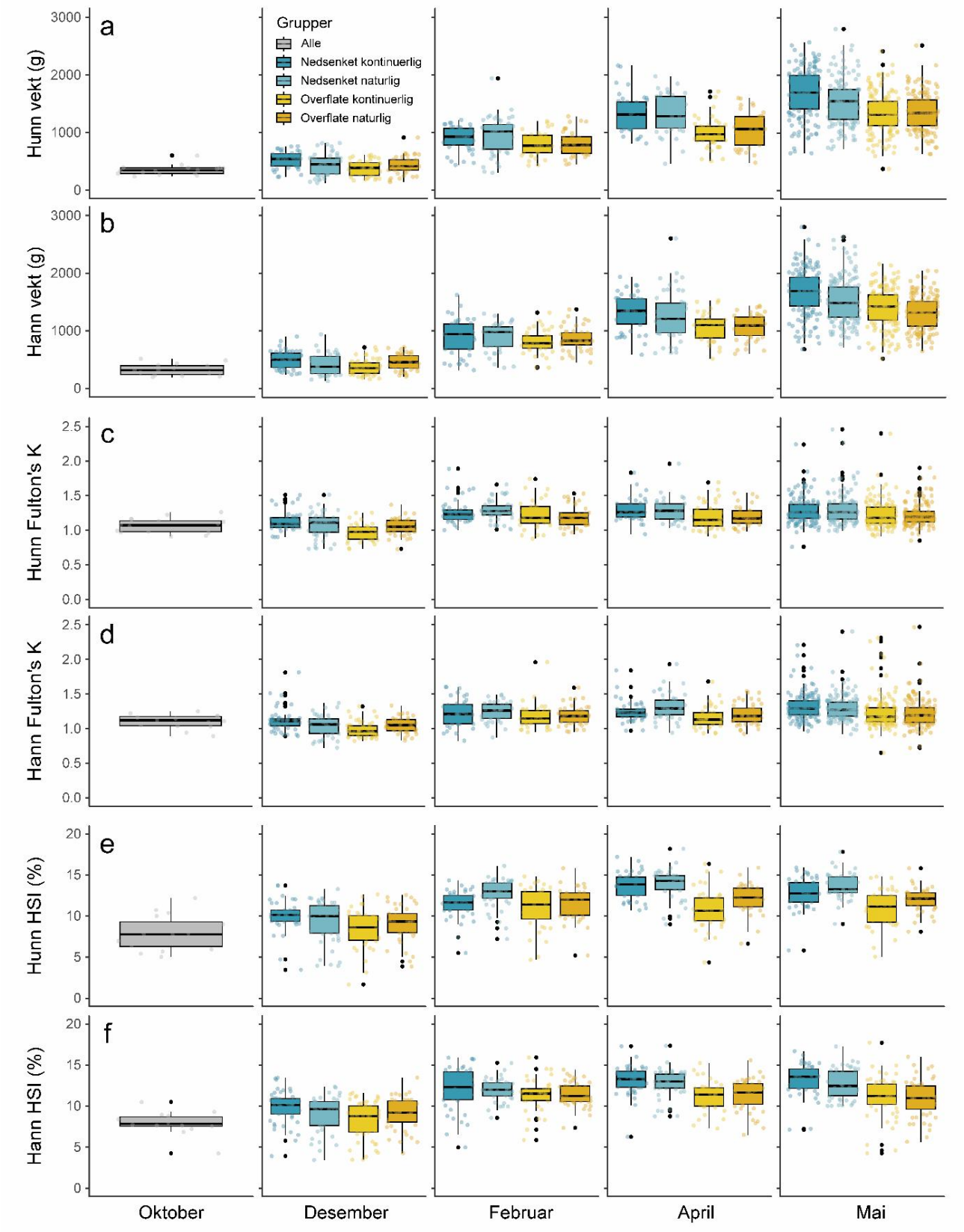
Hos hanner var gjennomsnittsvekten ved oppstart 328 g (Figur 6 b). I desember var fisk i overflatemerder med LL betydelig mindre (365 g) enn i de øvrige gruppene (416 til 488 g), mens de største hannene ble registrert i nedsenkede merder med LL. I mai var vekten i LL-gruppene 1,7 kg i nedsenkede merder og 1,4 kg i

overflatemerdene, mens de i NL-gruppene var 1,5 kg og 1,3 kg i nedsenkede versus overflatemerdene. Hos hunner fulgte vekten samme utviklingsmønster som hos hannene, med 348 g ved første prøvetaking i september (Figur 6 a). I desember var fisk i overflatemerder med LL også her betydelig mindre (383 g) enn i de andre gruppene (420 til 522 g), og de største hunnene ble funnet i nedsenkede merder med LL. Ved forsøksavslutning var hunnene i LL-gruppene 1,7 kg i de nedsenkede merdene og 1,3 kg i overflatemerdene, mens NL-gruppene veide i gjennomsnitt 1,5 kg og 1,3 kg i nedsenkede og overflatemerdene.

Hos hannene startet fisken med en kondisjonsfaktor (K) på 1,1 (Figur 6 d). I desember hadde nedsenkede merder med LL høyest K-verdi (K=1,12), mens fisk i overflatemerdene med LL hadde lavest kondisjon (K=0,98). NL-gruppene lå mellom disse, med K=1,04-1,05. Ved slutten av forsøket hadde fisk i nedsenkede merder bedre kondisjonsfaktor (LL: K=1,31 og NL: K=1,29) enn fisk i overflatemerder (LL: K=1,22 og NL: K=1,22). Hos hunner var utviklingen svært lik, med K=1,06 i september (Figur 6 c). K økte for fisk i nedsenkede merder med LL til K=1,13 i desember, mens lavest kondisjonsfaktor ble observert i overflate-LL (K=0,98), og NL- gruppene hadde mellomliggende verdier (K=1,04-K=1,07). I mai hadde begge nedsenkede grupper høyere kondisjonsfaktor (LL: 1,29 og NL: 1,30) enn overflategruppene (LL: 1,23 og NL: 1,23).

Hepatosomatisk indeks (HSI) var innledningsvis 7,9 % hos hanner (Figur 6 f). I likhet med K, var HSI høyest registrert hos fisk i nedsenkede LL-merder (9,9 %) og lavest i overflate-LL-merder (8,3 %). I mai var HSI høyere hos fisk i nedsenkede merder (LL: 13,2 % og NL: 12,7 %) enn hos fisk i overflatemerder (LL: 11,2 og NL: 11,0). Hos hunner var HSI ved oppstart også 7,9% (Figur 6 e). Etter fordeling av fisk i merd hadde fisk i nedsenkede LL-gruppen høyest HSI (10,4 %), etterfulgt av nedsenkede-NL (9,4%), overflate-NL (8,9 %) og overflate-LL (8,5 %). Ved forsøksavslutning var HSI høyere hos fisk i nedsenkede merder (LL: 12,9 % og NL: 13,7 %) enn hos fisk i overflatemerder (LL: 11,6 og NL: 12,0).

Samlet sett opprettholdt nedsenkede grupper, spesielt nedsenket-LL, best vekst, høyest kondisjonsfaktor og HSI, mens overflategruppene viste svakere indikatorer hos både hanner og hunner.



Figur 6 : Somatiske indikatorer i oppdrettstorsk (Gadus morhua) gjennom det første produksjonsåret. Vekt (i g) hos hunner (a) og hanner (b). Kondisjonsfaktor (Fulton's K) hos hunner (c) og hanner (d). Hepatosomatisk indeks hos hunner (e) og hanner (f). Utvalgsstørrelsene var 90 per gruppe/prøvetaking unntatt av september der n=30 og mai der n=100 per gruppe, kjønnsforhold = 50%. Boksplott viser interkvartilområdet (IQR) med medianlinje. Boksenes «whiskers» strekker seg til de mest ekstreme verdiene innen 1,5 × IQR, mens individuelle observasjoner er vist som punkter. De svarte prikkene representerer avvikene. Farger: Grå representerer første prøvetaking. Lys og mørkeblå representerer nedsenkede grupper med henholdsvis naturlig eller kontinuerlig lys. Oransje tilsvarer overflate grupper med naturlig lys, og gul overflate grupper med kontinuerlig lys.

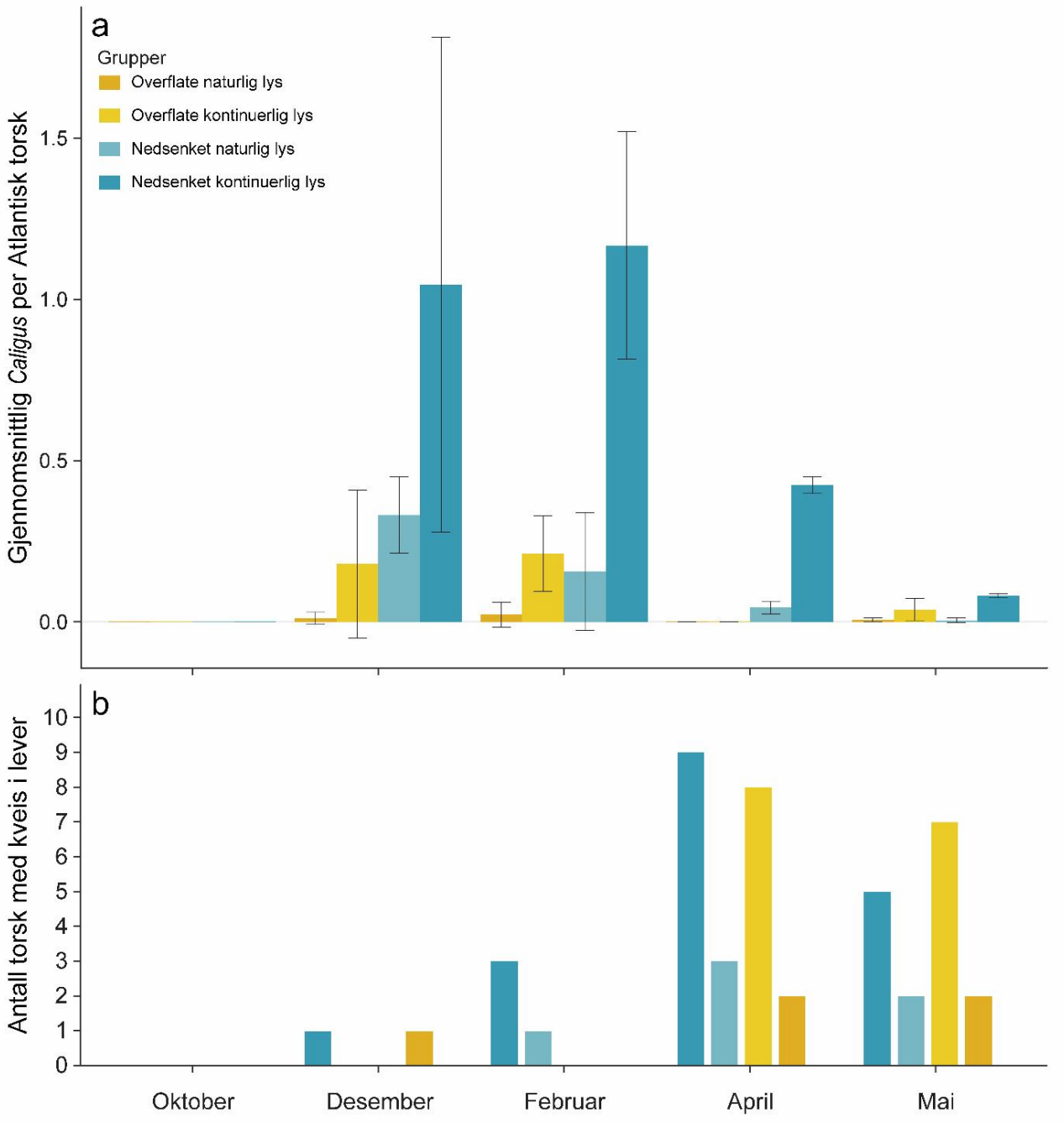
3.3.2 - Velferd hos torsk

Det ble målt flere parametere for å følge fiskevelferd, blant annet parasitter (antall lus per fisk, gjelleparasitter, kveis og svartprikksyke).

Lus (*Caligus sp*. og *Clavella sp*.) ble registrert fra andre prøvetaking i desember og videre gjennom hele forsøksperioden (Figur 7 a). Nedsenket LL-gruppe hadde gjennomgående flest lus, med høyeste gjennomsnitt i:

- desember: 1,1 lus per fisk
- februar: 1,2 lus per fisk

I de andre gruppene var det under 0,5 lus per fisk i gjennomsnitt.



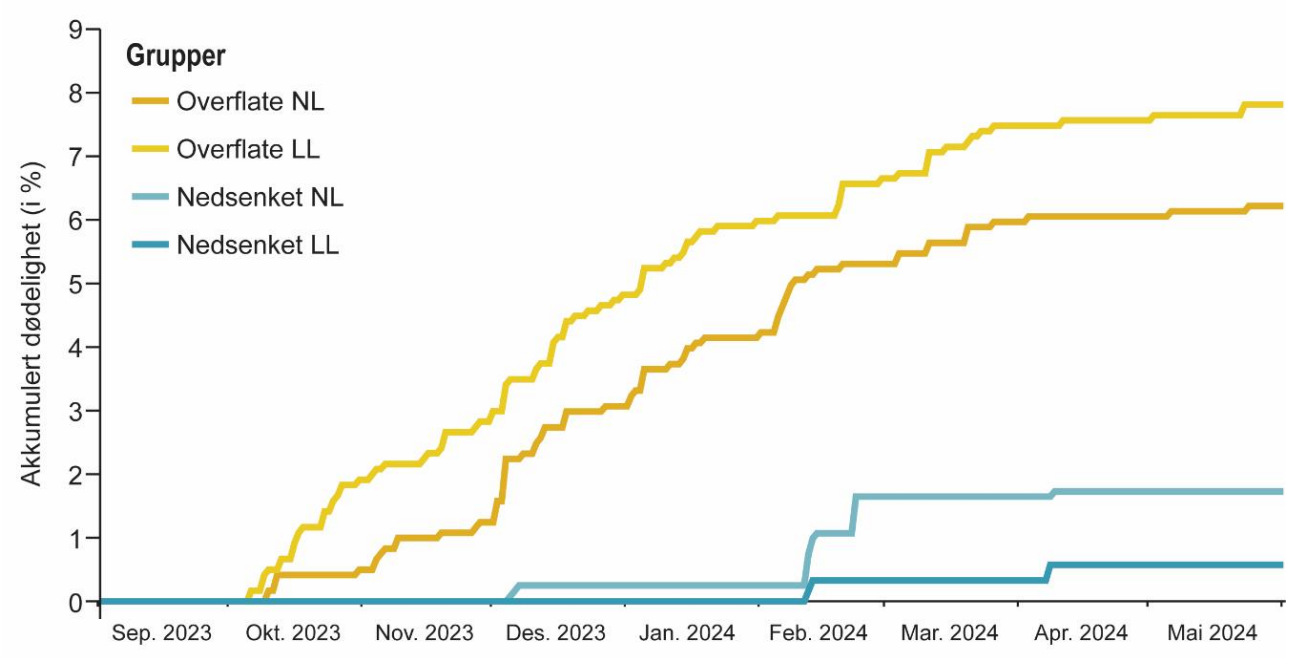
Figur 7 : Parasitter hos oppdrettstorsk. (a) Gjennomsnittlig antall lus per fisk ± standardavvik, (b) antall torsk med kveis i lever. Utvalgsstørrelsene var 90 per gruppe/prøvetaking unntatt av mai der n=100 per gruppe. Farger: Lys og mørkeblå representerer nedsenkede grupper med henholdsvis naturlig eller kontinuerlig lys. Oransje representerer overflate grupper med naturlig lys, og gul overflate grupper med kontinuerlig lys.

Det ble ikke funnet gjelleparasitter (*Lernæocera branchialis*) hos oppdrettstorsken. Når det gjelder kveis (*Anisakis simplex*) i lever, ble dette påvist fra desember til slutten av forsøket (Figur 7 b). I april og mai var det mer fisk med kveis i lever i LL-gruppene (8-9 og 5-7) enn i NL-gruppene (2-3 og 2), men det var fortsatt lavt antall.

Svartprikksyke (*Cryptocotyle lingua*) ble registrert hos flere fisk i april og mai, men på et lavt nivå. Antall prikker

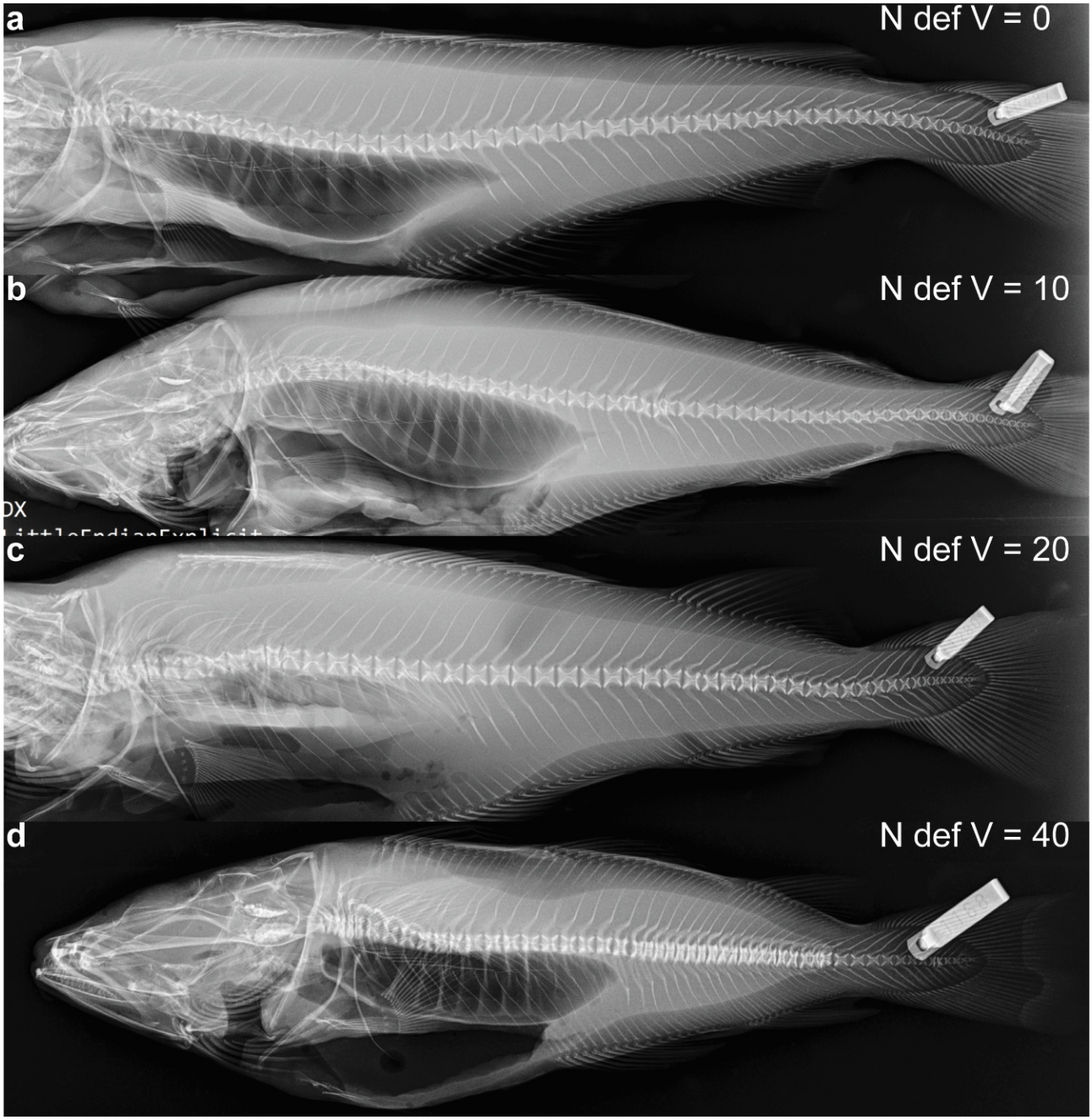
varierte mellom 0 til 17, og ble vurdert som mildt:

- LL nedsenket: 26 fisk (gjennomsnitt 1,8 prikker per fisk, maks 5)
- LL overflate: 17 fisk (gjennomsnitt 1,6, maks 5)
- NL nedsenket: 37 fisk (gjennomsnitt 2,5, maks 17)
- NL overflate: 31 fisk (gjennomsnitt 1,9, maks 8)



Figur 8 : Akkumulert dødelighet (i %) gjennom forsøksperioden for torsk i gruppene overflate NL, overflate LL, nedsenket NL, nedsenket LL. Antall fisk per gruppe: 1200.

Dødelighet var lav (Figur 8), men var signifikant høyere i overflatemerdene (6,2 til 7,8 %, 17-36 fisk per merd og per gruppe) enn de nedsenkete (1,7 til 0,6 %, 1-4 fisk per merd og per gruppe). Deformiteter hos oppdrettstorsk (Figur 9) ble undersøkt hos 63 fisk fra før forsøksstart (september 2023) og 72 fisk fra Nedsenket LL og 76 fisk fra Overflate NL fra slutt (mai 2024).

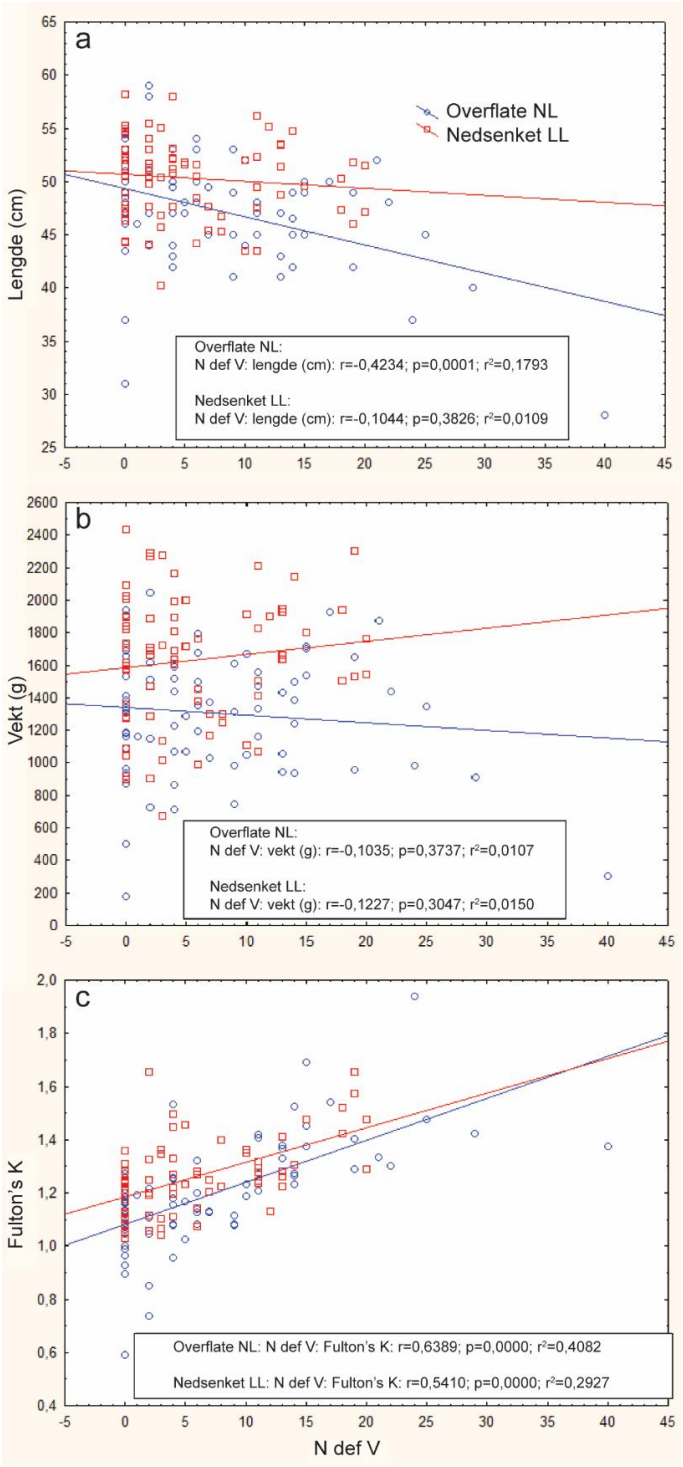


Figur 9 : Eksempel på røntgenbilder av oppdrettet torsk som viser (a) 0, (b) 10, (c) 20 eller (d) 40 virveldeformiteter.

Tabell 1 : '% def' er fisk som har en eller flere deformerte ryggvirvler ved røntgenundersøkelse. 'N def V' er gjennomsnittlig antall deformerte ryggvirvler hos den fisken som har 1 eller flere deformerte ryggvirvler. Dette sier noe om hvor alvorlige deformasjonene er.

	N	% def	N def V
September 2023	63	42,9	4,8±1,2
Nedsenket LL	72	70,8	8,0±0,9
Overflate NL	76	69,7	10,6±0,9

Deformasjoner var til stede fra start til slutt. Det ble observert en markant økning i både % deformert fisk og gjennomsnittlig antall deformerte ryggvirvler, mens behandlings gruppene er like. Det er en tendens til høyere 'N def V' hos Overflate NL sammenlignet med Nedsenket LL (P = 0,07). Det kan nevnes at hos Atlantisk laks så har en studie vist at slaktefisk med 10 eller flere deformerte ryggvirvler hadde redusert vekst og velferd (Hansen et al., 2010). Atlantisk laks har flere ryggvirvler enn torsk. Vi fant ikke negativ sammenheng mellom fiskevekt og antall deformerte virvler i mai 2024, men en negativ sammenheng mellom fiskelengde og N def V (Figur 10 a, b). hos Surface Natural på dette tidspunktet. Det var også en positiv sammenheng mellom N def V og kondisjonsfaktor i begge gruppene i mai 2024 (Figur 10 c).



Figur 10 : Sammenheng mellom antall virveldeformiteter (N def V) og (a) lengde (cm), (b) vekt (g) og (c) Fultons kondisjonsfaktor (K), for fisk holdt i merd med Overflate NL (blå sirkler/blå regresjonslinje) og Nedsenket LL (røde firkanter/rød regresjonslinje). For hver gruppe er regresjonslinje samt korrelasjonskoeffisient (r), p-verdi og forklaringsgrad (r²) angitt.

3.3.3 - Kjønnsmodning hos torsk under lysbehandling

Ved starten av eksperimentet var GSI hos begge kjønn svært lav og lik mellom gruppene. De ble funnet signifikante forskjeller mellom gruppene over tid hos både hanner og hunner, og det var hovedsakelig hannene som modnet. GSI økte hos fisk i NL-gruppene, særlig hos hanner, mens verdiene i LL-gruppene og hos hunner

forble svært lave og stabile (Figur 11 a, b). Toppverdier i GSI hos begge kjønn ble registrert i nedsenkede merder NL-gruppen i mai. Kun 0,7 % av hunnene nådde gytende modningsstadium ved slutten av forsøket, mens 11,6 % og 10,3 % av hannene ble vurdert makroskopisk som gytende i april og mai, henholdsvis. Alle gytende individer var i NL-gruppene, og i tillegg ble tre gytende hanner registrert i overflatemerdene med LL. Ingen fisk med gytespreng ble observert i dette forsøket.

Hos hanner var det en signifikant forskjell i GSI mellom gruppene ($p<0,001$) (Figur 11 a). GSI økte i NL-gruppene, spesielt i nedsenkede merder fra februar, nådde en topp i april, og sank deretter i mai. På individnivå var maksimal GSI i NL-gruppene 14,21 % (nedsenkede merder) og 10,69 % (overflatemerder), mens den høyeste verdien i LL-gruppene var 1,64 %. Makroskopisk vurdering av modningsgrad hos hanner viste at de fleste fisk var umodne eller tidlig modnende i september. I desember ble modnende fisk registrert i alle gruppene (Figur 11 d). I april og mai ble 87 gytende hanner observert, særlig i NL-gruppene hvor 96,5 % av de gytende fiskene tilhørte disse gruppene. De resterende 3,5 % gytende hanner var i LL overflatemerdene. Histologiske analyser av gonadevev hos hanner gir et mer detaljert bilde av modningsstadiene, selv om analysene er gjennomført på et begrenset antall individer. Ved forsøksstart og i desember var fisk enten umodne eller tidlig modnende (Figur 11 d). I februar og april ble det identifisert fisk med frie sædceller i NL-gruppene, mens LL-gruppene kun viste modnende stadier. Ved mai-prøvetakingen ble det påvist kjønnsmodning i alle grupper, og frie sædceller ble funnet hos 20 til 33 % av de analyserte fiskene.

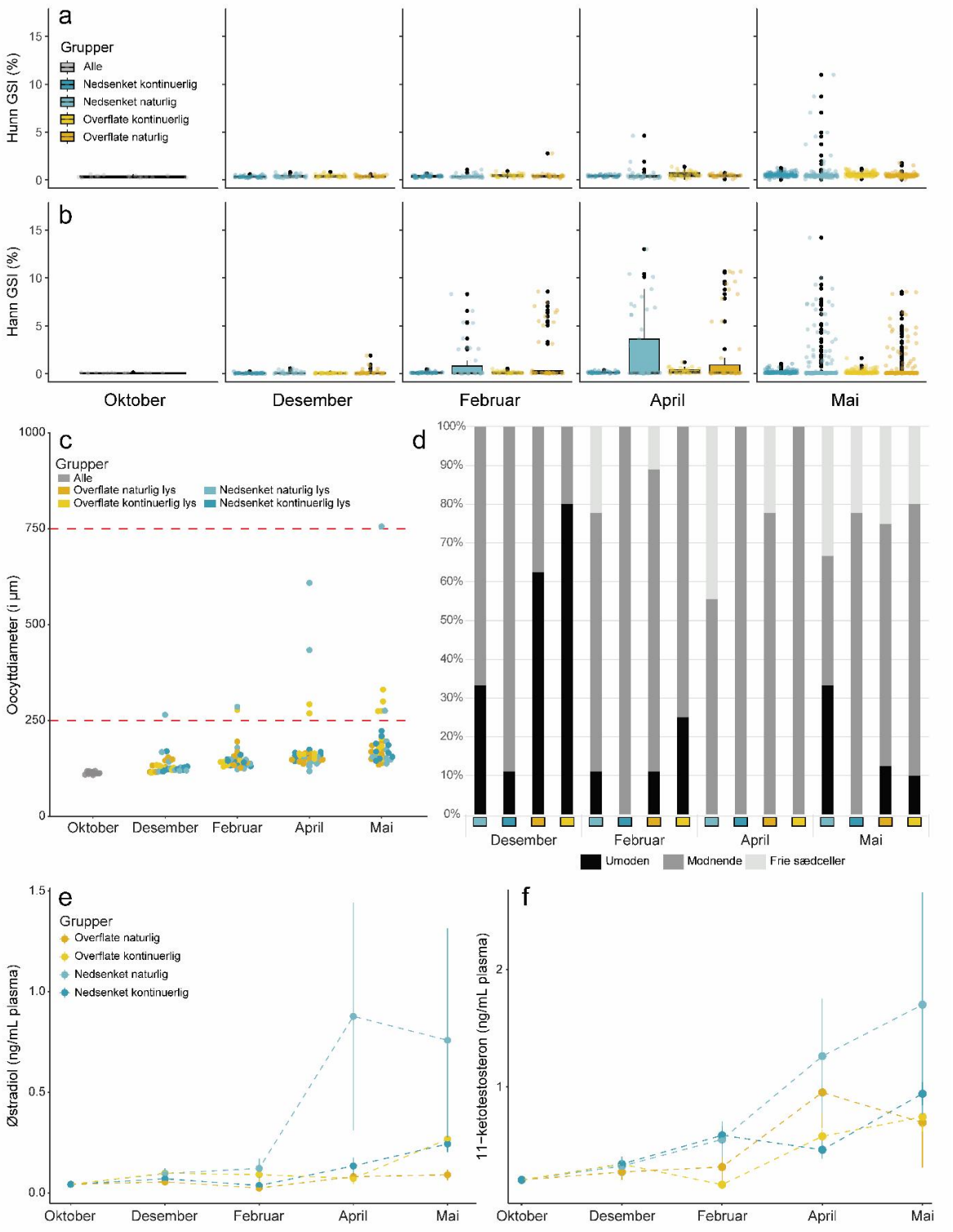
11-KT fulgte samme mønster som GSI (Figur 11 f). Verdiene var lave ved forsøksstart (0,21 ng/mL plasma), økte i NL-gruppene (særlig i nedsenkede merder), og nådde en topp i april og mai med 1,70 ng/mL plasma i nedsenket NL-gruppe. I LL-gruppene forble hormon verdiene stabile og oversteg ikke 1,49 ng/mL plasma på individnivå. Generelt var nivåene svært lave sammenlignet med det som er rapportert hos fullvoksne kjønnsmodne fisk (Dahle et al., 2003).

Hos hunner var GSI betydelig forskjellig mellom grupper og prøvetidspunkt ($p<0,001$). GSI begynte å øke hos enkelte individer i nedsenket NL-gruppen allerede i februar. Økningen ble særlig tydelig i april og mai (Figur 11 a), der høyeste GSI var 10,99 % og 10 fisk hadde GSI over 1 %, og ble vurdert som enten modnende (4 %) eller gytende (3 %). I overflatemerdene begynte noen få fisk å øke GSI i april og mai, men verdiene var svært lave. Ved slutten av forsøket hadde kun 7 fisk (5 %) i overflate-LL og 2 fisk (1 %) i overflate-NL en GSI over 1%. I nedsenket LL-gruppe var 3 fisk (2 %) over dette nivået. Totalt ble fire hunner vurdert som gytende, alle i nedsenkede merder med NL.

Ifølge histologiske analyser startet kun 13 av 162 hunner (8 %) kjønnsmodning i løpet av forsøket. Diameteren av de 10 % mest utviklede oocyttene hos hunnene viste at alle fisk var umodne ved forsøksstart, med oocyttdiameter under 250 µm (Figur 11 c). Ett individ i nedsenket NL-gruppe begynte å øke oocyttdiameteren allerede i desember. Fra februar ble det observert enkelte fisk med oocyttstørrelse over 250 µm i overflate-LL-gruppen. I april hadde to individer i nedsenket NL-gruppe oocytter med gjennomsnittsdiameter i avansert modning (vitellogenese), og et individ nådde stadium med hydrerte oocyttene (gytende individer) i mai. De få hunnene i overflate LL-gruppen som startet modning, viste oocytter i tidlig modningsstadium. Ved slutten av forsøket hadde fisk i nedsenket-LL-gruppen fortsatt ikke vist tegn til kjønnsmodning, og diameteren på de 10% mest utviklede oocyttene var under 250 µm.

E2 viste samme trend som GSI (Figur 11 e). I september var gjennomsnittlig verdi 0,04 ng/mL plasma. Østradiolnivåene i nedsenket NL-gruppe økte gjennom forsøksperioden og nådde en topp i april, med 0,88 ng/mL plasma i gjennomsnitt. Ingen grupper hadde gjennomsnittlige verdier over 1 ng/mL plasma i løpet av forsøket. I LL-gruppene var østradiolnivåene svært stabile og oversteg ikke 0,49 ng/mL plasma på individnivå. Hormonverdiene var generelt svært lave sammenlignet med det som tidligere er rapportert hos

førstegangsgytende torsk (Dahle et al., 2003), hvor viser at E2-nivåer på over 11 ng/ml plasma ble målt.



Figur 11 : Vurdering av kjønnsmodning hos torsk ved bruk av gonadosomatisk Index (GSI, i %) hos hunner (a) og hanner (b), (c) diameter (gjennomsnitt) av de 10% mest utviklede oocyttene hos hunner (i µm), (d) mikroskopisk vurdering av kjønnsmodning hos hanner, (e) østradiolverdier (ng/mL) hos hunner og (f) 11-ketotestosteronverdier (ng/mL) hos hanner. (a) og (b): Utvalgsstørrelsene var 90 per gruppe/prøvetaking unntatt av mai der n=100 per gruppe. (c)-(f): utvalgsstørrelsen var 9 fisk per gruppe/prøvetakingene. (a)-(b): Boksplott viser interkvartilområdet (IQR) med medianlinje. Boksenes «whiskers» strekker seg til de mest ekstreme verdiene innen 1,5 × IQR, mens individuelle observasjoner er vist som punkter. (e) og (f): Punktene representerer gjennomsnittet ± standardavvik. Farger: Grå representerer første prøvetaking. Lys og mørkeblå representerer nedsenkede grupper med henholdsvis naturlig eller kontinuerlig lys. Oransje tilsvarer overflate grupper med naturlig lys, gul overflate grupper med kontinuerlig lys.

3.4 - Diskusjon

Samlet sett opprettholdt nedsenkede grupper, spesielt LL nedsenket, best vekstprestasjon, høyest kondisjonsfaktor og HSI, mens overflategruppene viste svakere somatiske indikatorer hos både hanner og hunner. Forekomsten av parasitter var generelt lav. Noe lus ble observert, særlig i nedsenkede merder, men med lave nivåer. Velferd for de fleste individer var god, men en kohort av små «taperfisk» var til stede gjennom forsøket. Dødelighet var lav, men var signifikant høyere i overflatemerdene (6,2 til 7,8%, 17-36 fisk per merd og per gruppe) enn i de nedsenkede (1,7 til 0,6 %, 1-4 fisk per merd og per gruppe). Deformasjoner var til stede fra start til slutt.

Når det gjelder modning, så vi at noen fisk startet å modne i alle gruppene og nådde gytende stadie ved makroskopisk vurdering (0,7 % hunner og 7,3 % hanner). 96,5% av de gytende hannene var i NL gruppene, mens de resterende var i LL overflatemerdene. I NL-gruppene, spesielt i nedsenkede merder og i noe mindre grad i overflatemerder, ble det registrert kjønnsmodning tidlig på våren, men nivåene av kjønnshormoner lå lavere enn det som er beskrevet hos fisk som gjennomfører full pubertet (Dahle et al., 2003). Ved forsøksavslutning var det frie sædceller hos hanner i alle grupper, inkludert noen få individer i begge LL-gruppene, men makroskopisk gytende ble ikke sett i LL nedsenket gruppen. Hos hunner var modningsresponsen svakere. De individene som viste økning i oocyttdiameter og tegn til tidlig modning (for eksempel i overflatemerder med LL i mai) befant seg i svært tidlige stadier. Hunntorsk i nedsenkede merder med LL viste derimot ingen tegn til kjønnsmodning i forsøksperioden. Siden forsøket ble avsluttet i mai, vet vi ikke om fisk som startet modning i første produksjonsår ville ha gjennomgått hele prosessen fram til gyting, eller om modningen ville blitt avbrutt eller reversert.

Noe av den bedre tilveksten i de nedsenkete gruppene i forhold til tilsvarende overflatelys kan skyldes høyere temperatur. Det kan antydes en liten motsatt effekt på våren, da overflategruppen tar igjen noe av forskjellen i vekt.

Oppsummert så ser vi at nedsenkede merdene med demping av naturlig lys og bruk av LL med moderat lysstyrke gir null modning hos hunner og minimal modning hos hanner. Demping av naturlig lys med skyggenett i overflaten og sterkt lys gir lav modningsandel, men med mindre effekt enn kombinasjonen nedsenkning og moderat lys. Samtlige NL grupper viser normalt mønster i modning. Tilvekst og velferd var som forventet, men med bedre produksjon i dypet enn i overflaten.

4 - Kombinasjon av lys, fôr og nedsenking i andre produksjonsår

4.1 - Bakgrunn

Ettersom forsøksperiode 1 måtte avsluttes pga. brakklegging av lokaliteten kunne ikke eksperimentet gi svar på hvordan modning, tilvekst og velferd ville ha utviklet seg videre hos fisk opp til slaktestørrelse. En andel fisk ble derfor holdt på land med tilførsel av dypt, kaldt vann fra september 2023 til september 2024 for å kunne gjennomføre videre studier i merder fra høsten 2024.

Det er også blitt hevdet at egg fra førstegangsgytende fisk som har fått moderne vekstfôr har svært lav, eller ingen, overlevelse dersom de gyter i merd og eggene slippes ut (Bjørn et al., 2021). Det finnes imidlertid ingen uavhengig dokumentasjon som underbygger dette, og slik dokumentasjon er viktig å fremskaffe.

I dette merdforsøket, var målene derfor å undersøke hvordan demping av lys med nedsenkning kombinert med moderat styrke tilleggslys (LL) i dypet sammenlignet med høy lysstyrke nær overflaten påvirker tilvekst, kjønnsmodning og velferd, samt fekunditet og overlevelse av avkom hos torsk i merder sammenlignet med naturlig lys (NL). Videre ønsket vi å kartlegge mulige effekter av fôrtype på de samme indikatorene.

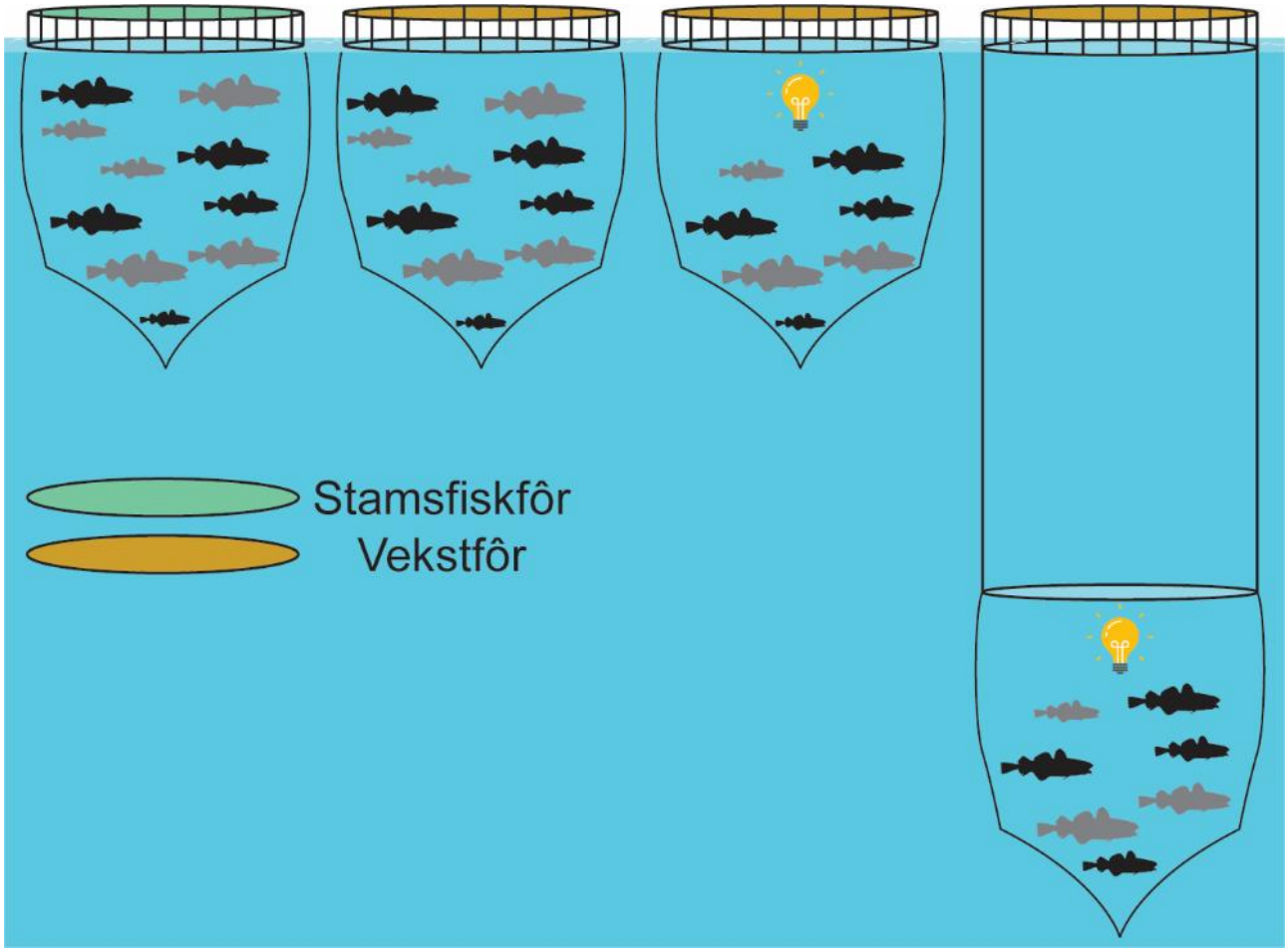
4.2 - Oppsett

Torskeyngel ble produsert høsten 2022 ved Ode AS fra Nofima-stammen, 7. generasjons avlslinje. Fisken ble oppdrettet ved Austevoll Rensefisk under kontinuerlig lys og overført til innendørs kar med naturlig lys ved Havforskningsinstituttets forskningsstasjon i Austevoll i september 2023. Der ble de holdt på 7,9 til 8,2 °C og NL. Den 26.03.24 ble en andel fisk i ett kar gitt LL fra lampe (Würth LED lyskaster Flex III, 230W) montert over kar og skjermet fra naturlig lys. Lysintensiteten i karet ble målt i et grid av horisontale og vertikale punkter med og uten fisk over lysmåler og varierte fra 1 til 17 µE $m^{-2}s^{-1}$. I september 2024 ble totalt 1440 torsk overført til sjøanlegget og fordelt i fire grupper i tre repliserte merder per behandling. Fisken fra LL kar gikk videre til LL behandling i sjø, mens fisk fra NL kar ble gitt NL i sjø (Figur 12):

- Overflatemerder, naturlig lys og stamfiskfôr
- Overflatemerder, naturlig lys og vekstfôr
- Overflatemerder, kontinuerlig lys (2500W) og vekstfôr
- Nedsenkede merder med kontinuerlig lys (600W) og vekstfôr

Torsken (20 hunner og 40 hanner per behandling) i NL gruppene ble overført til kar på land i februar for å gyte. Der ble den holdt på 8,0 °C og NL.

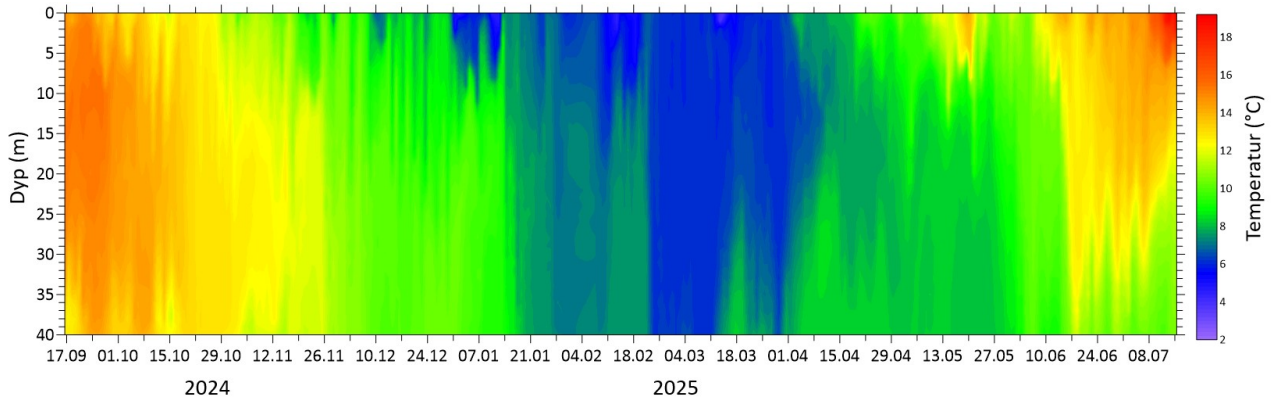
Prøvetaking ble gjennomført hver sjette uke gjennom forsøksperioden, som i forsøk 1. I tillegg ble det utviklet og benyttet en skala for velferdskåring av hvert enkelt individ som ble tatt ut ved uttak. Fisk ble også tatt opp i kar på land for studier på fekunditet og avkom. De statistiske metodene som ble benyttet for forsøk 1 ble repetert på dette datasettet.



Figur 12 : Skjematisk fremstilling av gruppeoppsett andre produksjonsår. I overflate: Naturlig lys med stamfiskfôr eller vekstfôr, Kontinuerlig lys (2500W) med vekstfôr. Nedsenket: kontinuerlig lys (600W) med vekstfôr.

4.2.1 - Miljø

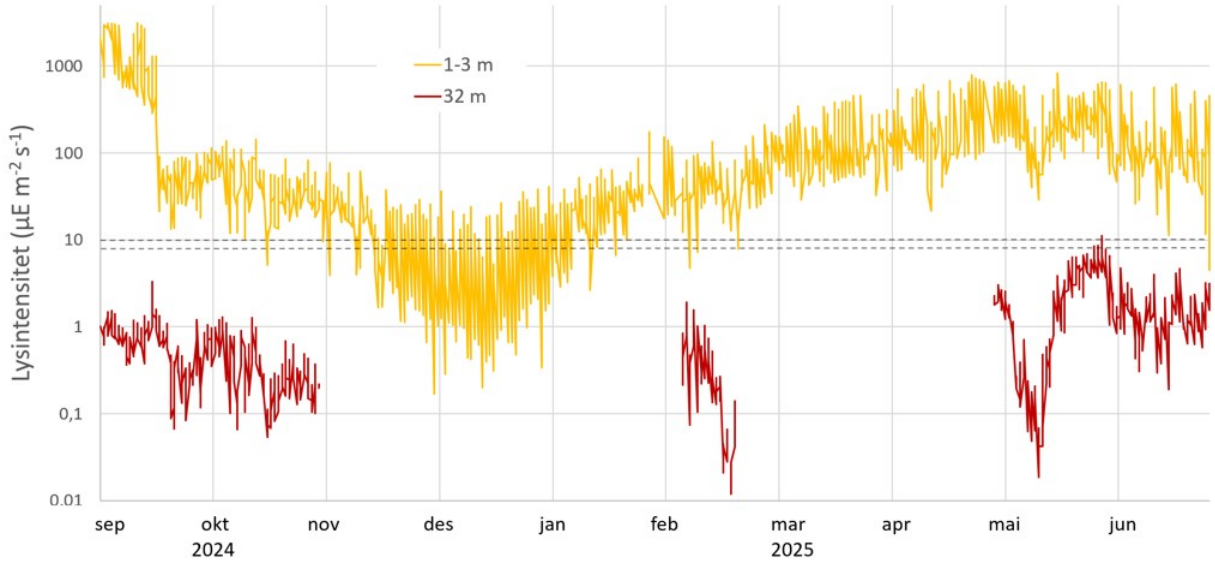
Temperaturen i forsøket fulgte normale sesongmessige svingninger og variasjon med dyp (Figur 13). Etter utsett var det omtrent 14 °C i hele vannsøylen hvoretter overflatetemperaturen sank til omtrent 10 °C fra slutten av oktober, 6 °C i desember og holdt seg stabil på omtrent 6 °C frem til våren. Derfra steg overflatetemperaturen til 10-12 °C i slutten av mai og 15 °C i juni. Fisken gitt naturlig lys i overflatemerdene ble overført til landkar i begynnelsen av februar for å unngå gyting i merd. Den nedsenkede fisken opplevde senere nedgang i temperatur og hadde stort sett 2-4 °C høyere temperatur enn fisken i overflatemerdene frem til februar/ mars. Den nedsenkede fisken opplevde 2-6 °C lavere temperaturer enn overflatefisken gjennom senvinter- og vårperioden. Om sommeren var det 12-14 °C på 32 m dyp. Oppsummert så opplevde den nedsenkede fisken en høyere døgngradsum enn fisk i overflatemerdene fra utsett til mars. Gjennom våren opplevde de en lavere temperatur, og en akseptabel temperatur gjennom sommeren. Det var ikke målt ekstreme temperaturer gjennom forsøksperioden på 32 m dyp. Oksygennivået var alltid målt til >85% metning og var ikke utfordrende for torsken. Saltholdigheten i overflaten varierte ned til omtrent 28 ppt, mens den nedsenkete fisken alltid opplevde fullt sjøvann.



Figur 13 : Plot av daglige temperatur målinger utført med profilerende CTD fra 0-40 m.

4.2.2 - Lys

De naturlige lysgruppene opplevde sesong- og dag/ natt variasjoner i lysintensitet, mens lysgruppene opplevde konstant lys så sant det naturlige lyset ikke oversteg belysningen som lampene ga (Figur 14). Som i forsøk 1 ble det vurdert at torsken til enhver tid opplevde verdier >10 µE s^{-1} m^{-2} i LL i overflaten (2500W) og >8 µE s^{-1} m^{-2} i LL nedsenket merd som følge av det kunstige tilleggslyset. Lysmålere (Licor, 193SA probe) ble satt til å måle hver time og plassert inne i en av NL overflatemerdene på representativt dypt (flyttet fra omtrent 1 til 3 m i overflatemerd i oktober) i forhold til fiskens svømmedyp på dagtid (1-4 m dybde) og på 32 m dyp mellom de nedsenkete NL merdene. På grunn av driftstekniske utfordringer med måleprobe og kabel ble ikke lyset målt fra november til februar og mars til mai i den nedsenkete gruppen, men sammenlignende lysnivå kan leses fra året før i Figur 5. Det opplevde lyset i nedsenket LL gruppe var alltid høyere enn det naturlige nivået på dagtid (32 m i Figur 14) og opplevde aldri en dag/ natt variasjon i lysintensitet. Noen få dager i begynnelsen av juni var det naturlige lyset omtrent det samme som tilleggslyset. Overflate LL gruppen opplevde dag/ natt variasjon fra september og frem til begynnelsen av desember, men det kunstige lyset var så vidt sterkere enn det naturlige i en måned midtvinters, hvoretter det naturlige lyset stort sett betydelig sterkere frem til avslutning av forsøket i slutten av juni.



Figur 14 : Plott viser gjennomsnittlig lysintensitet på dagtid (10:00-15:00) gjennom forsøksperiode fra september 2024 til juli 2025 målt på 1-3 m dyp i NL merd i overflaten (gul linje) og på 32 m dyp i nedsenket NL merd (rød linje). Lysmåler ble flyttet etter fiskens svømmedyp i overflaten fra omtrent 1 m i september til 3 m fra oktober. Minimum lysintensitet 1-3 m unna lyskilde for LL merder er gitt som stiplete linjer. Manglende linje indikerer manglende data.

4.3 - Resultater

4.3.1 - Vekst og kondisjonsfaktor hos oppdrettstorsk

Ved utsett i merder i september 2024 var gjennomsnittsvekten 1,8-2,1 kg i LL- og NL-gruppene. NL-fiskene vokste videre til 3,1 kg (vekstfôr) og 3,3 kg (stamfiskfôr) i gjennomsnitt ved avslutningen i mai etter endt gytesesong. Ved slutten av forsøket var LL-fiskene 4,8-4,9 kg i juli. Det ble registrert en stagnasjon i vekst mellom mai og juli hos begge kjønn i LL-gruppene (Figur 15), noe som trolig kan knyttes til høye sjøtemperaturer (14 °C) tidlig på sommeren (Figur 13). Totalt sett ble det ikke påvist noen signifikant effekt av fôrtype eller nedsenkning på sluttfiskevekten gjennom forsøksperioden. Det kan virke som om det er forskjeller mellom grupper i Figur 15, men på grunn av variasjonen mellom individer og lavt antall n per gruppe kunne ingen signifikante forskjeller sees.

Hos hanner var gjennomsnittsvekten ved oppstart 1,8-2,1 kg i LL- og NL-gruppene. I januar var fisk i begge NL-gruppene betydelig tyngre enn i LL-gruppene (Figur 15 a). I februar ble det derimot ikke registrert noen signifikante forskjeller mellom behandlingene. Vekten i NL-gruppen med vekstfôr begynte å avta i april, uten at dette ga signifikante forskjeller mellom gruppene. Mellom april og mai økte vekten markant i LL-gruppene (+1,1 kg i nedsenkede merder og +2,1 kg i overflatemerder i gjennomsnitt), mens veksten stagnerte i NL-gruppene, med en sluttvekt på 3,3 kg. I juli var hannene i LL-gruppene 4,9 kg i nedsenkede merder og 4,6 kg i overflatemerder. Referansegruppen med villtorsk hadde da en gjennomsnittsvekt på 2,4 kg.

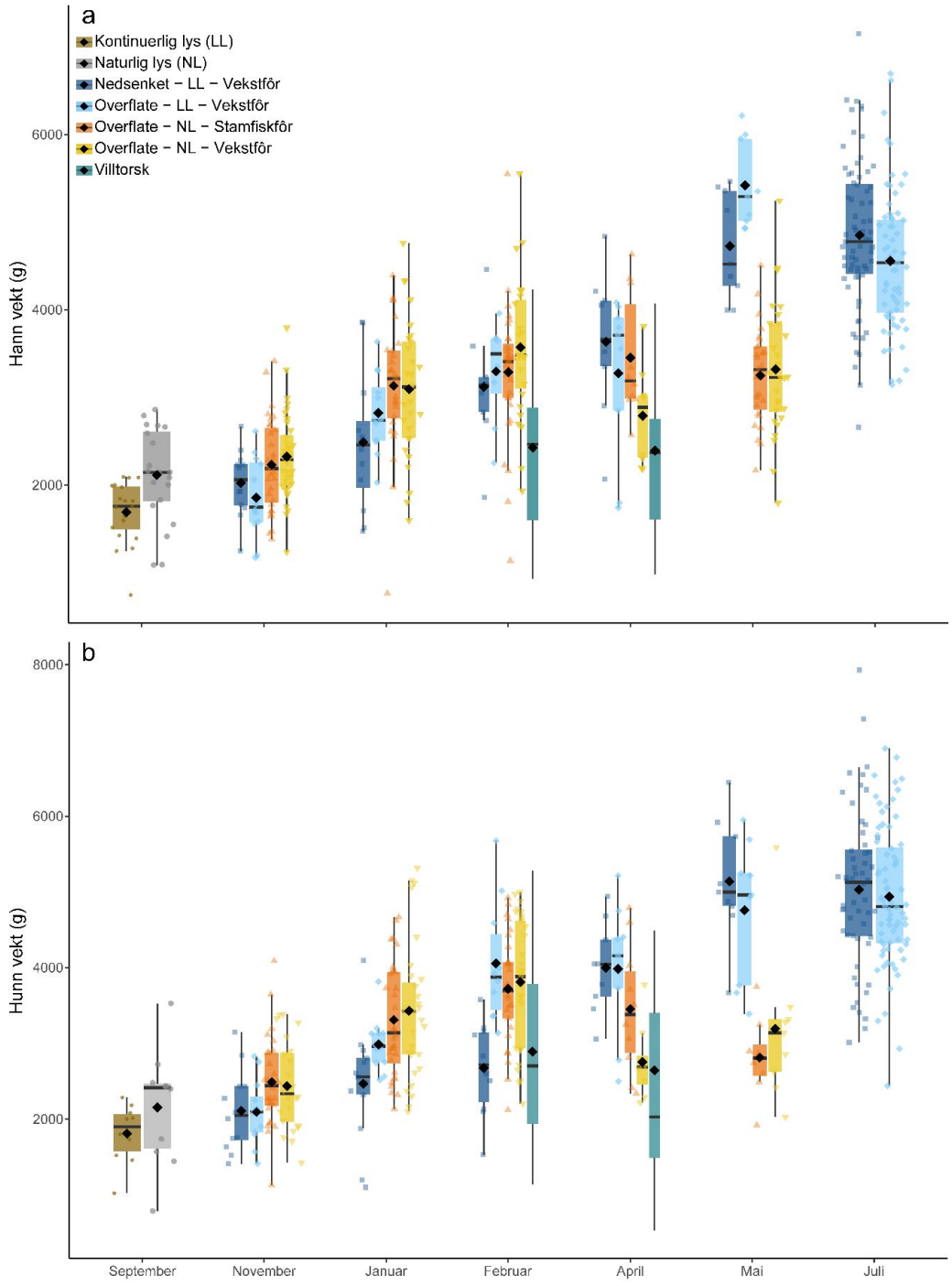
Hos hunner fulgte vekten samme utviklingsmønster som hos hanner, med 1,8–2,2 kg ved første prøvetaking i september. I januar var fisk i NL-gruppene også her betydelig tyngre enn i LL-gruppene (Figur 15 b). I februar var imidlertid fisk i nedsenkede merder signifikant mindre (2,7 kg) enn de øvrige gruppene (3,7–4,1 kg i gjennomsnitt). Denne gruppen tok senere igjen de andre, og sluttvekten i LL-gruppene var i juli lik med 5,0 og 4,9 kg i nedsenkede og overflatemerder, henholdsvis. Ved avslutning av forsøket for NL-gruppene i mai var

hunnfisk 3,2 kg i vekstfôrgruppen og 2,8 kg i stamfiskfôrgruppen, noe som var signifikant lavere enn i LL-gruppene. Denne forskjellen kan knyttes til energiinvestering i gonadeutvikling hos NL-fisk (se 5.3.3), som både reduserer vekst og påvirker kroppsmassen gjennom selve gytesesongen, med frigjøring av egg og sædceller. Referansegruppen med villtorsk var gjennomgående mindre enn oppdrettstorsk, og varierte mellom 2,9 og 2,6 kg fra ankomst til slutten av gytesesongen.

Samlet sett opprettholdt LL-gruppene, spesielt LL nedsenket, en klart bedre vekst, mens NL-gruppene viste avtagende eller stagnerende vekst i midtre og sene prøvetakinger hos både hanner og hunner.

Hos hannene startet alle grupper med tilnærmet lik kondisjonsfaktor (K=1,14-1,20). I januar hadde NL-gruppene (K≈1,43) signifikant bedre kondisjon enn LL-gruppen i nedsenkede merder (K=1,16). I februar nådde begge NL-gruppene-toppnivå (K≈1,52), før kondisjonsfaktoren sank betydelig frem til mai. LL-gruppen i nedsenkede merder viste derimot en jevn forbedring fra februar og nådde høyeste nivå (K=1,67), og overgikk begge NL-gruppene i april og mai. I mai hadde begge LL-gruppene (K≈1,60-1,67) signifikant høyere kondisjonsfaktor enn NL-gruppene (K≈1,26-1,28). Deretter sank K noe i LL-gruppene, men holdt seg på relativt høye verdier rundt 1,50.

Hos hunnene var det ingen signifikante forskjeller i kondisjonsfaktor mellom gruppene fra første prøvetaking til og med april. I mai hadde derimot begge LL-gruppene signifikant høyere kondisjonsfaktor (1,56 og 1,54) enn NL-gruppen i overflatemerder med vekstfôr (1,13), mens NL-gruppens overflatemerder med stamfiskfôr lå på et middels nivå (1,27).



Figur 15 : Fiskevekt (i g) av atlantisk torsk (Gadus morhua) i løpet av det andre produksjonsåret hos hanner (a) og hunner (b). Utvalgsstørrelsene varierte fra 8-36 per gruppe/prøvetakingene hos hanner og 8–33 per gruppe på tvers av prøvetakingene hos hunner. Boksplott viser interkvartilområdet (IQR) med medianlinje. Boksenes «whiskers» strekker seg til de mest ekstreme verdiene innen 1,5 × IQR, mens individuelle observasjoner er vist som punkter. Svarte diamanter angir gjennomsnittet i hver gruppe. Grå farge tilsvarer NL-gruppen og brun farge er LL-gruppen i den første prøvetakingen. Lys og mørkeblå tilsvarer LL-gruppene med enten overflate eller nedsenkede merder, henholdsvis. Oransje farge tilsvarer NL-gruppe med stamfiskfôr, gul farge NL-gruppe med vekstfôr, og grønn farge villtorsk.

4.3.2 - Velferd hos torsk

4.3.2.1 - Parasitter hos oppdrettstorsk

Det ble målt flere parametere for å følge fiskevelferd, blant annet parasitter (antall lus per fisk, gjelleparasitter, kveis og svartprikksyke) samt en egen velferdsscore basert på LAKSVEL.

Lus (*Caligus sp*. og *Clavella sp*.) ble registrert fra andre prøvetaking i november og videre gjennom hele forsøksperioden. Nedsenket LL-gruppe hadde gjennomgående flest lus, med høyeste gjennomsnitt i:

- januar: 7,24 lus per fisk
- mai: 7,8 lus per fisk
- juli: 8,2 lus per fisk

I overflatemerder var det under 1 lus per fisk i gjennomsnitt. Det nedsenkete lyset kan tiltrekke annen fisk og flere arter rundt de nedsenkede merdene. Det ble observert plankton rundt lyskildene om natten både i de nedsenkete og overflate gruppene med lys.

Det ble ikke funnet gjelleparasitter (*Lernæocera branchialis*) hos oppdrettstorsken. Når det gjelder kveis (*Anisakis simplex*) i lever, ble dette påvist hos fire fisk; tre i LL-gruppene og én i NL-gruppen.

Svartprikksyke (*Cryptocotyle lingua*) ble registrert hos flere fisk, men på et lavt nivå. Antall prikker varierte mellom 0 og 10, og ble vurdert som mildt:

- LL nedsenket: 85 fisk (gjennomsnitt 1,9 prikker per fisk, maks 10)
- LL overflate: 89 fisk (gjennomsnitt 1,8, maks 4)
- NL overflate, stamfiskfôr: 102 fisk (gjennomsnitt 2,2, maks 7)
- NL overflate, vekstfôr: 125 fisk (gjennomsnitt 1,9, maks 10)

4.3.2.2 - Velferdsskåring basert på LAKSVEL

Velferdsskåring hos oppdrettstorsk fokuserte hovedsakelig på ytre velferdsindikatorer og var basert på den veletablerte LAKSVEL-protokollen utviklet for laks og regnbueørret. Det finnes per i dag ingen egen velferdsscore utviklet for torsk, men vi har tatt utgangspunkt i indikatorer som er etablert for laks, og det ser ut til at de fleste av disse fungerer godt også for torsk.

Skalaen gikk fra 0 til 3:

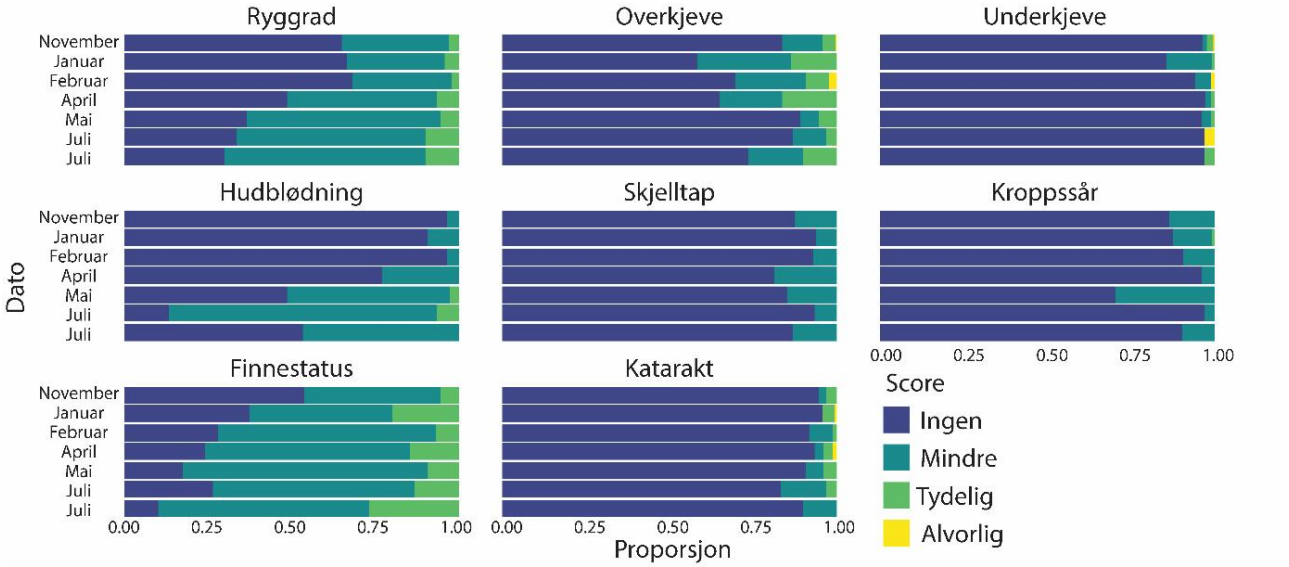
- 0: helt frisk og normal fisk
- 1: mindre skade/avvik, antas å ha liten betydning for velferd
- 2: tydelig skade med moderat betydning for velferd; fisken kan leges under gode forhold
- 3: alvorlig skade med store konsekvenser for velferd; fisken vurderes ofte for avlivning

Hos oppdrettstorsk ble følgende indikatorer brukt (Figur 16):

- skjelltap
- hudblødning
- kroppssår

- kjevedeformiteter
- ryggradsdeformiteter
- øyeblakking
- finnestatus

Generelt ble det registrert svært lite skader som hudblødninger, skjelltap og sår. Slike funn forekom sporadisk, og de fleste fikk skår 1, altså mindre skader som fisken sannsynligvis kan leve godt med. Finneskader forekom noe hyppigere. Det var hovedsakelig erosjonsskader, og delvis splitting av finner. Dette tyder på at håndteringsrelaterte skader ikke er dominerende. Brystfinnene var oftest påvirket, med noe skade også på hale- og ryggfinne. Forekomsten av katarakt var lav, men enkelte fisk hadde delvis eller fullstendig blindhet. Det var generelt små forskjeller mellom de ulike prøvetakingstidspunktene. Det mest fremtredende velferdsproblemet var deformiteter i rygg og kjeve. Disse var vanskelige å skåre presist da de fremstod noe annerledes enn det som oftest er vist hos laks, men ble hovedsakelig vurdert som milde til moderate deformiteter i ryggrad og overkjeve, og noen fisk med lettere deformiteter i underkjeve. Samlet sett var det små forskjeller mellom gruppene. Det ble registrert en del rygg- og kjevedeformiteter og noe erosjon av finner, men få alvorlige ytre skader.



Figur 16 : Velferdsskåring hos oppdrettstorsk gitt som gjennomsnittlig proporsjon av alle fisk ved hvert prøveuttak fra november 2024 til juli 2025.

Dødelighet var lav, men var høyere i overflatemerdene (2,1 til 6,1 %, 1-7 fisk per merd og per gruppe; høyest andel i overflate LL) enn de nedsenkete (0,8 %, 1 fisk per merd og per gruppe).

4.3.3 - Kjønnsmodning hos torsk under lysbehandling

Ved starten av eksperimentet var GSI hos begge kjønn svært lav og lik mellom de to lysgruppene (hanner: NL: 0,21 % og LL: 0,14 %; hunner: NL: 0,94 % og LL: 0,80 %). De første forskjellene ble synlige allerede i november, da NL-gruppene viste en klar økning. Hos både hanner og hunner økte GSI i NL-gruppene gjennom

forsøksperioden som forventet, mens GSI i LL-gruppene forble svært lav og stabil (Figur 17 a, b). Toppverdier i GSI hos begge kjønn i NL-gruppene ble registrert mellom februar og april, og sank deretter brått i mai, etter gytesesongen. Ved ankomst (14 og 21 februar 2025) var referansefiskene (villtorsk) allerede gytende. Ingen fisk med gytespreng ble observert i dette forsøket.

Hos hanner var det en signifikant forskjell mellom LL- og NL-gruppene gjennom hele forsøksperioden, mens det ble ikke registrert noen effekt av fôrtype eller nedsenking (Figur 17 a). På gruppenivå ble den høyeste GSI hos hanner registrert i februar, med 8,92±1,07 % i NL-gruppen med stamfiskfôr og 8,01±1,03 % i NL-gruppen med vekstfôr. På individnivå var maksimal GSI i NL-gruppene 15,23 %, mens den var 3,15 % i LL-gruppene. Makroskopisk vurdering av modningsgrad hos hanner viste at de fleste fisk var tidlig modnende i september, selv om noen individer fortsatt var umodne. I november ble det registrert modnende fisk i NL-gruppene, og de første gytende hannene ble observert i februar, utelukkende i NL-gruppene. I april og mai besto prøvetakingene kun av gytende eller utgytte hanner. Gjennom hele perioden forble fisk i LL-gruppene i et tidlig modningsstadium. Histologiske analyser av gonadevev hos hanner pågår fortsatt.

11-KT fulgte samme mønster som GSI. Verdiene var lave ved forsøksstart (0,58 og 1,02 ng/mL plasma i LL- og NL-gruppene, henholdsvis), økte i NL-gruppene og nådde en topp i februar med 4,25 og 4,29 ng/mL plasma i stamfisk- og vekstfôrgruppene, og avtok deretter. Disse verdiene samsvarer med data fra litteraturen for hanner som modner for første gang, der 11-KT høyest i kjønnsmoden fisk (Dahle et al., 2003). I LL-gruppene forble verdiene stabile og oversteg ikke 1,24 ng/mL plasma i gjennomsnitt.

Hos hunner var GSI betydelig forskjellig mellom lysbehandlingene. Fra januar hadde NL-gruppene høyere GSI enn LL-gruppene, og heller ikke her ble det påvist noen effekt av fôrtype eller nedsenking (Figur 17 b). Toppverdiene i GSI hos hunner i NL-gruppene ble registrert i april, med 18,25±2,67 % i stamfiskfôrgruppen og 13,32±3,91 % i vekstfôrgruppen. I LL-gruppene varierte GSI mellom 0,88 og 1,31 % i gjennomsnitt gjennom forsøksperioden, med en maksimal verdi på 2,61 % på individnivå.

Diameteren av de 10 % mest utviklede oocyttene fulgte samme mønster som GSI (Figur 17 c). Ved forsøksstart var nesten alle fisk umodne, med oocyttdiameter under eller rundt 250 µm. Oocyttstørrelsen begynte å øke fra november i alle gruppene, men i LL-gruppene ble det observert en stagnasjon på nivåer som tilsvarer tidlig modning (under ca. 400 µm), mens torsk i NL-gruppene hadde oocytter i avansert modning (vitellogenese) fra januar og de første hydrerte oocyttene (gytende individer) allerede i begynnelsen av februar. I april var alle fisk enten gytende eller utgytt, og i mai kun utgytt i NL-fiskene. Til sammenligning viser resultatene fra Korsøen mfl. (2013), at 90 % av hunnene i LL-gruppene nådde avanserte modningsstadier eller gyting i begynnelsen av sommeren.

E2 viste samme trend som GSI. I september var gjennomsnittlig verdi i LL-gruppene 0,28 ng/mL plasma, mens NL-gruppene hadde 0,73 ng/mL plasma. I NL-gruppene økte E2 gjennom forsøksperioden og nådde en topp i februar, kort tid før gytesesongen, med 11,75 ng/mL plasma i stamfiskfôrgruppen og 15,82 ng/mL plasma i vekstfôrgruppen. Etter februar falt verdiene til 0,05 og 0,07 ng/mL plasma. I LL-gruppene var E2-nivåene svært stabile og oversteg ikke 1,22 ng/mL plasma i gjennomsnitt.

4.4 - Diskusjon

I dette forsøket, var målet å undersøke hvordan demping av lys med nedsenkning kombinert med tilleggslys (LL) av moderat styrke eller sterkt lys i overflatemerder påvirker tilvekst, kjønnsmodning og velferd hos torsk i merder sammenlignet med naturlig lys (NL) i overflatemerder med vekst- eller stamfiskfôr.

Bruk av kontinuerlig tilleggslys på fisk i det andre produksjonsåret (ca. 2 år og eldre) fra slutten av mars (kar) og

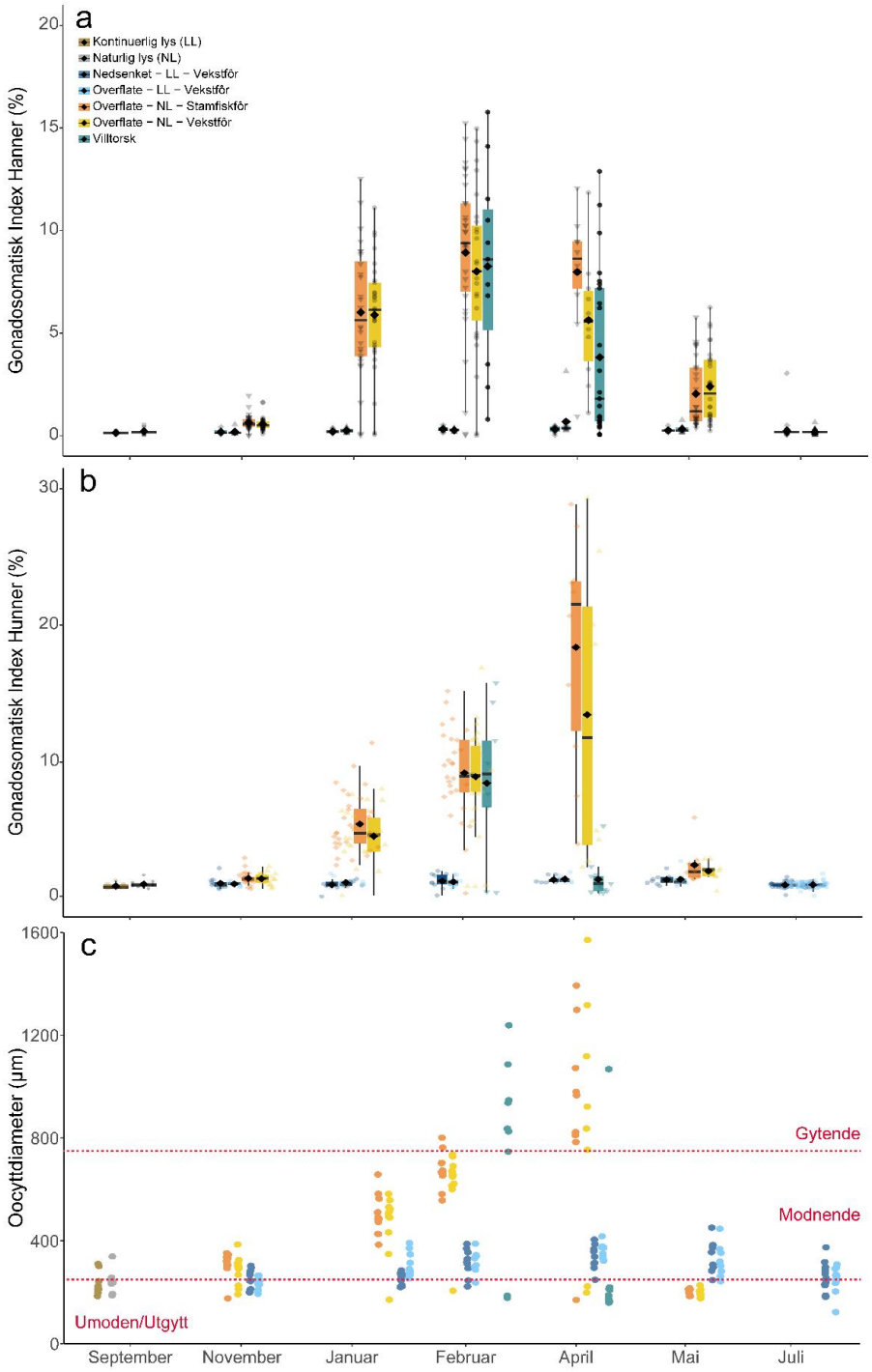
september (overflatemerder, 2500 W og nedsenkede merder, 600 W) resulterte i full stagnasjon i kjønnsmodning frem til slaktestørrelse på 4,6-5,0 kg i juli. NL-gruppene gjennomgikk kjønnsmodning som forventet og startet gyting mot slutten av vinteren. Verken fôrtype eller nedsenkning med moderat lys versus sterkt lys i overflatemerd i seg selv hadde noen tydelig effekt på modning i det andre produksjonsåret.

Når det gjelder vekst, opprettholdt LL-gruppene, særlig LL nedsenket, best vekst, mens NL-gruppene viste avtagende eller stagnerende vekst i midtre og sene prøvetakinger hos både hanner og hunner på grunn av investering av energi til gonadeutvikling heller enn til somatisk vekst.

Velferdsvurderingen viser at LAKSVEL-protokollen relativt enkelt lar seg tilpasse til torsk, og at det største velferdsmessige problemet i dette forsøket var rygg- og kjevedeformiteter hos oppdrettstorsk . Forekomsten av parasitter var generelt lav gjennom perioden. Det ble registrert noe lus, særlig i nedsenkede merder, som kan være knyttet til at lys i et mørkt miljø om natten tiltrekker plankton, andre fisk og arter rundt merdene.

Resultatene fra dette eksperimentet er oppmuntrende med tanke på å begrense kjønnsmodning og samtidig opprettholde god vekst og velferd. Samtidig var fisken som ble brukt allerede relativt stor og gammel ved utsett i merd, noe som ikke fullt ut reflekterer vanlig industriell praksis. Som vist i foregående kapittel, er effekten på pubertet og tidlig kjønnsmodning mer nyanserte når fisk følges over tid fra tidligere livsstadier.

I tillegg viser vurderingen av modningsstadiene til oppdrettstorsk, som gjøres årlig av Fiskeridirektoratet og Havforskningsinstituttet, at en andel av fisken i kommersielle merdene er i stand til å modne og gyte (Alix et al., 2024, 2026). Det vil derfor være viktig å studere hele produksjonssyklusen og effekten av kontinuerlig lys til ulike tider på modning hos torsk, med variasjon i alder og størrelse ved innsett i merd, for å kunne gi mer robuste anbefalinger til næringen.



Figur 17 : Estimering av kjønnsmodning hos torsk ved bruk av gonadosomatisk Index (GSI, i %) hos hanner (a) og hunner (b) og diameter av 10% mest utviklede oocytter hos hunner (i µm). (a) og (b): utvalgsstørrelsene varierte fra 8-36 per gruppe/prøvetakingene hos hanner og 8–33 per gruppe på tvers av prøvetakingene hos hunner. (c): utvalgstørrelsen varierte fra 5-15 fisk per gruppe/prøvetakingene. Boksplott viser interkvartilområdet (IQR) med medianlinje. Boksenes «whiskers» strekker seg til de mest ekstreme verdiene innen 1,5 × IQR, mens individuelle observasjoner er vist som punkter. Svarte diamanter angir gjennomsnittet i hver gruppe. Grå farge tilsvarer NL-gruppen og brun farge er LL-gruppen i den første prøvetakingen. Lys og mørkeblå tilsvarer LL-gruppene med enten overflate eller nedsenkede merder, henholdsvis. Oransje farge tilsvarer NL-gruppe med stamfiskfôr, gul farge NL-gruppe med vekstfôr, og grønn farge villtorsk.

5 - Påvirker fôr avkom hos oppdrettstorsk?

5.1 - Bakgrunn

Ernæring hos stamfisk kan påvirke gametkvaliteten og kan dermed også påvirke avkommets kvalitet (Bobe & Labbé, 2010; Migaud et al., 2013). I oppdrett benyttes hovedsakelig to fôrtyper: vekstfôr, som er formulert for å fremme rask vekst hos fisken til en akseptabel pris, og stamfiskfôr, som er utviklet for å optimalisere gametkvaliteten og dermed avkommets kvalitet, men er samtidig mer kostbart. I kommersiell produksjon av torsk i sjømerder benyttes vekstfôr gjennom hele produksjonssyklusen.

Det har blitt hevdet at egg fra førstegangsgytende torsk som er fôret opp på dagens vekstfôr har svært lav eller ingen overlevelse dersom de gytes i merd og slippes ut i miljøet (Grefsrud et al., 2022). Dette er imidlertid ikke dokumentert, og det er derfor viktig å fremskaffe uavhengig vitenskapelig dokumentasjon. Sommeren 2022 ba Fiskeridirektoratet Havforskningsinstituttet om kunnskapsstøtte for å belyse denne problemstillingen. Utvidelse av MOTOR-prosjektet med NFD midler (HI intern midler, prosjekt Torsk no. 15194-01) utgjorde en viktig del av dette kunnskapsgrunnlaget gjennom undersøkelser av egg- og larvekvalitet hos oppdrettstorsk (AP2). Målet med dette forsøket var å undersøke gyting og overlevelse fra egg til larver hos oppdrettstorsk gitt naturlige og kunstige lysregimer, samt ved ulikt oppdrettsdyp med tilhørende sesongsvingninger i temperatur. Ingen individer fra LL-gruppene ble inkludert, siden de ikke modnet.

5.2 - Oppsett

Det ble forventet at fisk i NL-gruppene fra AP1-2 ville være kjønnsmoden våren 2025. To grupper ble derfor holdt i sjømerder og fôret med enten vekstfôr eller stamfiskfôr. Før gytesesongen ble kjønnsmoden fisk (totalt 60 individer per gruppe; 20 hunner og 40 hanner) tatt opp og overført til innendørs kar utstyrt med eggsamlere, under simulert naturlig fotoperiode og ved 8 °C. I tillegg ble en tredje gruppe med villtorsk (referansegruppe), fanget i området rundt Havforskningsinstituttets forskningsstasjon i Austevoll, og overført til et tilsvarende kar med eggsamlere.

Egg ble samlet daglig, eggvolum ble målt, og bilder av et delutvalg egg ble tatt for å beregne befruktningsraten etter metoden beskrevet av Dahle mfl. (2022). Normalt utviklede embryoer (96 per eggbatch) ble inkubert i 24-brønners NUNC-plater ved 6 °C frem til klekking. Overlevelse og klekking (i %) ble vurdert daglig. Larvene ble deretter fotografert og målt i mikroskop for analyse av deformiteter.

Prosentbaserte data som befruktningsrate, overlevelsesrate og klekkingsrate, ble analysert ved hjelp av ikke-parametriske tester ettersom dataene ikke var normalfordelte. En Kruskal–Wallis rangsumtest ble brukt for å vurdere signifikante forskjeller mellom behandlingsgruppene, og Dunns test med Benjamini–Hochberg (BH)-korreksjon ble brukt som post hoc-test for å identifisere hvilke grupper som var signifikant forskjellige gjennom parvise sammenligninger.

5.3 - Resultater

Oppdrettstorsk i NL-gruppene startet å gyte i slutten av februar, med svært lave volumer (Figur 18 a). Villtorsken var allerede i gyting ved ankomst til forskningsstasjonen. Dette gjør det vanskelig å estimere totalt eggvolum og gytesesongens varighet for denne gruppen. I tillegg begrenser de få prøvetidspunktene (3. mars og 8. april), som ble brukt til datainnsamling fra stamfisken i referansegruppen, muligheten for presis estimering av disse parameterne.

Stamfiskfôr-gruppen produserte større total eggvolum enn vekstfôr-gruppen, med en topp på mer enn to liter midt i sesongen. Selv om stamfiskfôr-gruppen hadde numerisk høyere volum enn vekstfôr-gruppen gjennom hele sesongen (med likt antall hunner, n = 20 i hver gruppe), var forskjellen ikke statistisk signifikant (Wilcoxon-test, W = 2641,5; p = 0,623). I en senere fase sank det daglige eggvolumet betydelig i begge fôrgruppene, og produksjonen opphørte til slutt i begynnelsen av mai.

Befruktningsratene var signifikant forskjellige mellom gruppene (Figur 18 b), med høyest rate hos villtorsk (93,5 % i gjennomsnitt) og lav variasjon mellom eggbatcher. Oppdrettstorsk viste lavere befruktningsrate og større variasjon. Blant oppdrettstorsken hadde stamfiskfôr-gruppen høyere befruktningsrate enn vekstfôr-gruppen (64,6 % vs. 44,3 % i gjennomsnitt).

Den daglige overlevelsesraten hos embryoer under inkubasjonen var signifikant høyere hos villtorsk, etterfulgt av vekstfôr-gruppen og deretter stamfiskfôr-gruppen. Forløpet viste høyere overlevelse i villtorskgruppen, mens begge oppdrettstorskgruppene viste lignende mønstre (Figur 18 c). Det var ingen signifikant forskjell mellom de to oppdrettstorskgruppene. Ved slutten av embryoperioden var overlevelsen i gjennomsnitt over 50 % i alle grupper.

Larver begynte å klekke etter 15 dager med inkubasjon. Klekkingsratene for de inkuberte eggbatchene (Figur 18 d) var signifikant forskjellige mellom gruppene ($p < 0,05$). Villtorskgruppen hadde signifikant høyere klekkingsrate (82,0 % i gjennomsnitt) enn vekstfôr-gruppen (65,4 % i gjennomsnitt) og stamfiskfôr-gruppen (57,5 % i gjennomsnitt). Lengden på larvene ved klekking varierte betydelig mellom de undersøkte gruppene (Figur 18 e), selv om forskjellene var små. Avkom fra stamfiskfôr-gruppen var størst (4,56 mm), etterfulgt av vekstfôr-gruppen (4,51 mm) og villtorsk-gruppen (4,35 mm).

5.4 - Diskusjon

Fôr og ernæring hos stamfisk er en av de viktigste miljøparametere som kan påvirke kvaliteten på gameter og avkom (Bobe & Labbé, 2010; Migaud et al., 2013). Ved eventuell gyting i merd hos oppdrettstorsk var målet med dette forsøket å undersøke gyting og overlevelse fra egg til larver hos oppdrettstorsk gitt naturlige (NL) og kunstige lysregimer og ulikt oppdrettsdypt med tilhørende sesongsvingninger i temperatur.

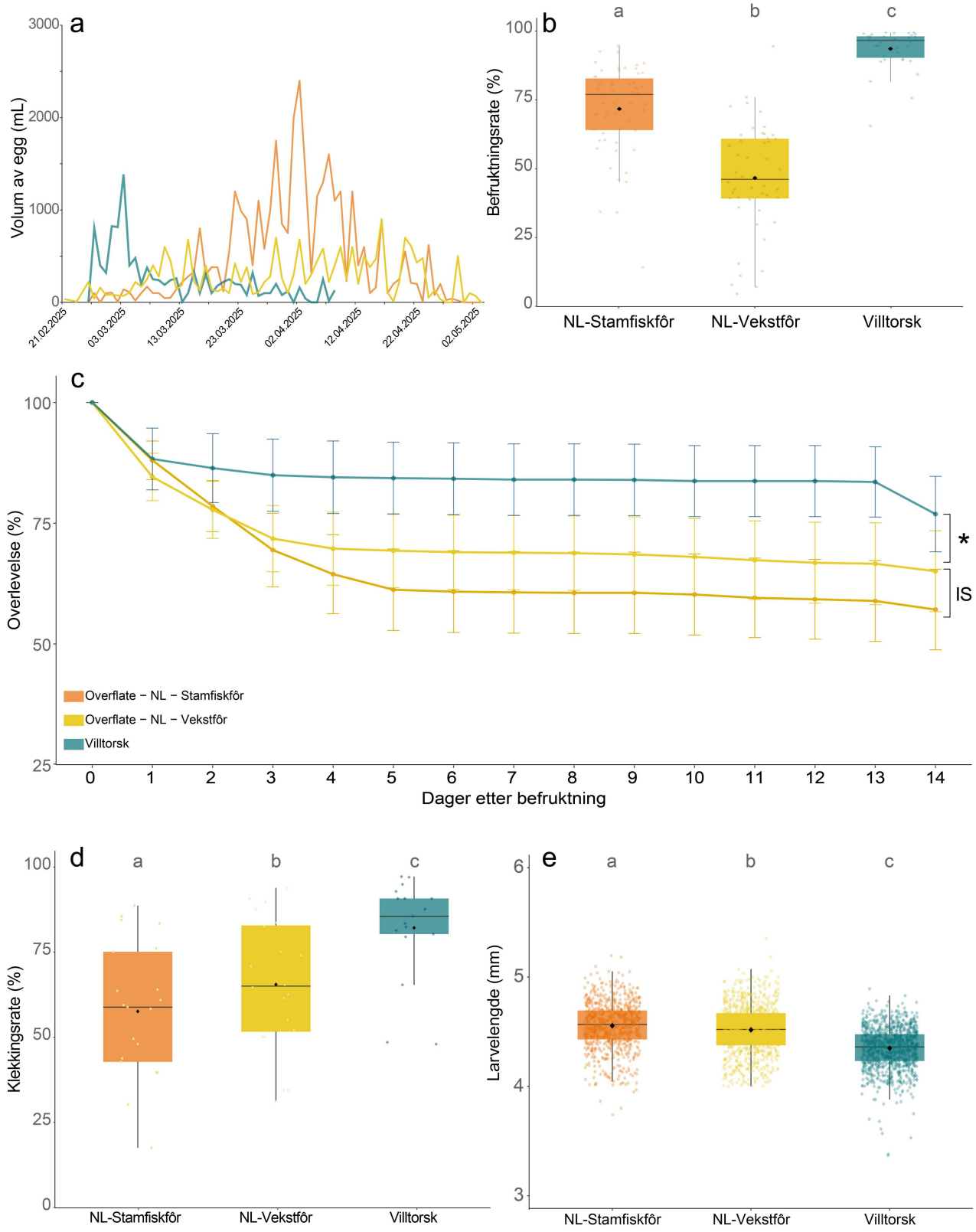
Ingen oppdrettstorsk under kontinuerlig lysbehandling (LL) ble gytemoden under dette forsøket og disse gruppene kunne derfor ikke inngå i analysene av embryoutvikling og overlevelse. Dette begrenser i praksis muligheten til å vurdere effekten av ulik oppdrettsdyp og temperaturregime, fordi datagrunnlaget for LL-gruppene mangler på dette livsstadiet.

Resultatene viser tydelige forskjeller i gyting og embryonal utvikling mellom villtorsk og oppdrettstorsk i NL gruppene. Villtorsk hadde gjennomgående høyere befruktningsgrad, bedre overlevelse gjennom embryogenesen og høyere klekkingssuksess enn oppdrettstorsk. Det ble også observert store forskjeller mellom de to fôrgruppene hos oppdrettstorsk, med flere egg og høyere befruktningsprosent hos fisk som fikk stamfiskfôr. Derimot var forskjellene i utviklingssuksess (embryo–larve) mellom fôrtypene relativt små.

Samlet sett tyder resultatene på at både domestisering og fôring kan påvirke reproduksjonssuksess og tidlig utvikling hos torsk, men at fôrtype har en mer moderat effekt enn forskjellene mellom vill og oppdrettet fisk. Avkom fra oppdrettstorsk var tydelig i stand til å overleve fram til klekking dersom gyting fant sted i kar med merdoppdrettet fisk.

Tidligere studier fra forrige oppdrettsrunde (2006-2012), blant annet et forsøk i Heimarkspollen i Austevoll der oppdrettstorsk med genetiske markører fikk gyte i merd, har vist at befruktede egg kan unnslippe merdene,

overleve gjennom tidlige livsstadier og nå kjønnsmoden alder, og deretter delta i gyting på lokale gytefelt (Jørstad et al., 2008; van der Meeren et al., 2012). Dette utelukker ikke at forskjeller i overlevelse knyttet til genetikk eller atferd kan eksistere når oppdrettsfisk settes ut i naturen etter 7.–8 generasjoner med domestisering.



Figur 18: Gyte- og reproduksjonssuksess hos oppdrettstorsk gitt stamfiskfôr eller vekstfôr og villtorsk (referansegruppe). a) Totalt eggvolum (mL) gytt i løpet av hele forsøksperioden. Hvert kar inneholdt 20 hunner av oppdrettstorsk og 15–25 hunner av villtorsk. b) Befruktningsrate (%) for egg fra naturlig gyting ifølge Dahlke et al., 2022. Utvalgsstørrelse: stamfiskfôr: n=48, vekstfôr: n=58, villtorsk: n=35. c) Overlevelse gjennom embryogenesen (%) fra befruktning til klekking. Totalt ble 19–21 eggbatcher undersøkt ved 6 °C, med 100 egg per batch. d) Klekkingsrate (%) for 19–21 eggbatcher undersøkt ved 6 °C, med 100 egg per batch. e) Larvelengde ved klekking (mm). Boksplott viser interkvartilområdet (IQR) med medianlinjer, og svarte diamanter indikerer gjennomsnittet i hver gruppe. Strekkene knyttet til boksene viser den generelle spredningen av hoveddelen av dataene, mens uteliggere markerer ekstreme verdier. Oransje farge tilsvarer NL-gruppe med stamfiskfôr, gul farge NL-gruppe med vekstfôr, og grønn farge villtorsk. Signifikante forskjeller ($p < 0,05$) ble indikert med ulike bokstaver eller en asterisk. IS: ikke signifikant

6 - Oppsummering, prosjektets måloppnåelse og fremtidige perspektiver

Prosjektets mål var å utvikle en innovativ, bærekraftig metode for å produsere torsk i merder fram til slaktestørrelse uten kjønnsmodning, med god vekst, normal atferd og velferd. Det ble derfor undersøkt hvordan kombinasjoner av lysregime (naturlig lys, NL, og kontinuerlig tilleggslys, LL), nedsenkning vs. overflatemerder, samt ulike fôrtype påvirker vekst, kjønnsmodning, reproduksjonssuksess, velferd og parasittstatus hos samme fiskegruppe oppdrettstorsk i første og andre produksjonsår fordelt på to adskilte forsøk i småskala merder.

Somatiske indikatorer (vekst, kondisjonsfaktor, HSI) viste gjennomgående at fisk i nedsenkede merder hadde bedre vekstprestasjon og høyere kondisjonsfaktor og HSI enn fisk i overflatemerder målt ved slutten av forsøkene. Dette gjaldt både i første og andre produksjonsår, og særlig i grupper med LL, hvor man fikk best effekt der LL var lik eller overgikk det naturlige lysets intensitet (LL nedsenket). Overflatemerder, spesielt under NL (se det andre produksjonsår), viste lavere vekst og svakere somatiske indikatorer, noe som stemmer med økt energiinvestering i kjønnsmodning hos disse gruppene.

Når det gjelder kjønnsmodning, var det hovedsakelig hanner (i det første produksjonsår) som modnet, og modningsresponsen var betydelig i NL-gruppene. I første produksjonsår startet hanner å modne i alle grupper, men LL bidro til å holde modningen på et meget lavt nivå og forsinke og/ eller hindre full utvikling. I andre produksjonsår viste kontinuerlig lys (LL) en tydelig dempende effekt på kjønnsmodning, med ingen gytende fisk og stagnasjon i videre modningsutvikling, mens NL-gruppene gjennomgikk modning og startet gyting som forventet.

Oppdrettstorsk som fikk stamfiskfôr i andre produksjonsår produserte flere egg og hadde høyere befruktningsprosent enn fisk på vekstfôr, men forskjellene i videre utviklingssuksess (embryo–larve) mellom fôrtypene var relativt små. Avkom fra oppdrettstorsk kan overleve til klekking ved gyting fra merdoppdrettet fisk. Dette bekreftes av både dette forsøket og tidligere studier som viser at befruktede egg kan forlate merdene og gi opphav til kjønnsmoden fisk i naturen.

Velferdsvurderinger (basert på LAKSVEL-protokollen) viste at metoden lar seg bruke på torsk, og at de største velferdsutfordringene i dette prosjektet var rygg- og kjevedeformiteter. Parasittforekomsten var lav, med noe lus – særlig i nedsenkede merder – trolig knyttet til lysindusert tiltrekning av planktoniske organismer og andre fisk, samt nærhet til laksemerder.

Alt i alt viser prosjektet at kombinasjoner av nedsenkede merder og moderat sterkt kontinuerlig lys eller overflatemerder med sterkt lys kan redusere kjønnsmodning (til gytende fisk) til null for stor fisk og null for hunner i liten fisk og samtidig opprettholde god vekst og akseptabel velferd hos torsk, men at oppdrettstorsk fortsatt har potensial til å gyte og produsere levedyktig avkom dersom modning ikke kontrolleres tilstrekkelig. Hvor kraftige og hvor mange lys som må plasseres ut i merden for å skape tilstrekkelig modningshemmende effekt i kommersielle merder er usikkert. Ettersom man opplever demping fra lys som punktkilde burde det teoretisk sett heller være flere lys enn få kraftige lys. Men samtidig er effekten avhengig av fiskeatferd og hvilken avstand torsken holder til lysene og hvor ofte de passerer nært og fjernt. I laksemerden opplever fisken meget variable lysforhold avhengig av stimens kontinuerlige bevegelser (Hansen et al., 2017). Uansett så vises det prinsipielt i dette studie at et svakt/ moderat lys i nedsenket drift fungerer likegodt eller bedre enn kraftig lys i overflatemerder. På mange lokaliteter vil også temperaturforholdene til tider av året være bedre tilpasset torskens optimale forhold dypt enn grunt.

Basert på resultatene peker flere viktige forsknings- og forvaltningsbehov seg ut:

- **Studier over hele produksjonssyklusen**

Forsøksfisken i andre produksjonsår var relativt stor og gammel ved utsett, noe som avviker fra typisk industriell praksis. Det er behov for studier som følger torsk gjennom hele produksjonssyklusen – fra tidlige stadier til slaktestørrelse – under ulike kombinasjoner av lysregime både i kar og senere påvekst i sjø under ulike temperaturbetingelser, og nedsenkingsstrategi, for å gi mer robuste anbefalinger. Prinsipielle studier bør utføres i småskala og anbefalte produksjonsregimer verifiseres i industriell skala.

- **Kjønnsmodning hos hunner**

Modningsresponsen hos hunner var generell lav, men biologisk svært viktig. Mer målrettede studier på hunner – inkludert hormonprofil, oocyttutvikling og energifordeling mellom vekst og reproduksjon – vil være viktige for å forstå og kontrollere reproduksjonsrisikoen fullt ut.

- **Genetikk, domestisering og økologisk risiko**

Tidligere arbeid og dette prosjektet viser at oppdrettstorsk kan produsere avkom som overlever og potensielt kan delta i gyting på naturlige gytefelt. Videre studier bør fokusere på:

1. • hvordan genetisk bakgrunn og domestiseringsgrad påvirker overlevelse, atferd og tilpasning i naturen
   • potensielle genetiske og økologiske konsekvenser ved innblanding av oppdrettstorsk i ville bestander.

Til sammen gir prosjektet et viktig bidrag til kunnskapsgrunnlaget for bærekraftig oppdrett av torsk, og peker på konkrete tiltak – særlig bruk av kontinuerlig lys og nedsenkede merder – som kan redusere kjønnsmodning og samtidig opprettholde god vekst og velferd. Samtidig tydeliggjør resultatene at oppdrettstorsk fortsatt har potensial til å reprodusere og overleve, og at dette må tas hensyn til i videre forvaltning og utvikling av næringen.

7 - Leveranser

Prosjektets resultater ble formidlet og diskutert regelmessig med Cod Cluster, som inkluderer aktører innen torskeoppdrettsnæringen og Fiskeridirektoratet, gjennom flere møter i løpet av prosjektperioden. Funnene ble i tillegg presentert på flere nasjonale og internasjonale vitenskapelige konferanser:

- Alix M, Andersson E, Schulz R, Geitung L, Nola V, Fjelldal PG, Dempster T, Oppedal F, Norberg B (2026). Impacts of artificial light management and cage submergence on the reproductive physiology and welfare of farmed Atlantic cod (*Gadus morhua*): AQUA 2026, 28 september – 01 oktober, Ljubljana, Slovenia.
- Alix M, Yadav Ahir S, Geitung L, Perrichon P, Fraser T, Fjelldal PG, van der Meeren T, Harboe T, Utskot SO, Nola V, Oppedal F, Dempster T, Norberg B (2025). Reproductive biology and offspring development success in farmed cod are affected by nutrition, light and submergence. AQUA 2025, 22-25 september, Valencia, Spania.
- Alix M, Geitung L, Dempster T, Vatne Martinsen L, Møgster M, Nola V, Norberg B, Oppedal F (2024). Light, shading and submergence as methods to control farmed cod sexual maturation. AQUA 2024. 26-30 august, København, Danmark.
- Alix M, Dempster T, Nola V, Dahlgren A, Harvey M, Norberg B, Oppedal F (2024). Lys, skyggelegging og nedsenkning for å utsette kjønnsmodning hos oppdrettstorsk. Havbruk 2024, 22-24 oktober, Tromsø, Norge.
- Alix M (2026). Torskeoppdrett: utfordringer, pågående forskning og veien videre, Innakva konferanse, 24-25 mars, Lyngdal, Norge.

Prosjektet har ført til fire vitenskapelige manuskripter som er under arbeid eller planlagt:

- M1: Kontroll av kjønnsmodning hos torsk ved lysstyring i første produksjonsår (under arbeid)
- M2: Effekt av lysstyring og nedsenking på kjønnsmodning hos torsk i andre produksjonsår
- M3: Effekt av fôrtype på reproduksjonsbiologi hos torsk og avkommets kvalitet
- M4: Effekt av fôrtype på lipidmetabolisme hos stamfisk og avkom

Prosjektet har også resultert i følgende leveranser til referansegruppen og i publiserte rapporter fra Havforskningen:

- L.1 Protokoll for lysstyring i merd som hindrer kjønnsmodning i oppdrettstorsk og beskrivelse av hva som ikke virker.
- L.2 Dokumentasjon av levedyktighet hos egg gytt av førstegangsytende, avlet oppdrettstorsk fra F6/F8-generasjonen som har fått vekstfôr og Naturlig eller manipulert lysstyring (Sandlund et al., 2025).
- Denne rapporten.

8 - Referanser

Alix, M., Andersson, E., & Kleppe, L. (2026). *Vurdering av modninsgrad hos oppdrettstorsk: Overvåking av modning og gyting i merd* (Rapport fra Havforskningen Nr. 2026–15; Rapport fra Havforskningen, s. 51). Havforskningsinstituttet, IMR.

Alix, M., Kjesbu, O. S., & Anderson, K. C. (2020). From gametogenesis to spawning: How climate-driven warming affects teleost reproductive biology. *Journal of Fish Biology* , *97* (3), 607–632. https://doi.org/10.1111/jfb.14439

Alix, M., Mihaljevic, M., & Norberg, B. (2024). *Videreutviklet protokoll for vurdering av modningsgrad hos oppdrettstorsk* (Nr. 2024–58; Rapport fra Havforskningen, s. 61). Havforskningsinstituttet, IMR.

Árnason, T., & Björnsson, B. (2012). Spawning-related mortality in captive Atlantic cod (*Gadus morhua* L.). *Aquaculture Research*, *43*(2), 292–296. https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2011.02829.x

Bjørn, P. A., Glover, K. A., Grefsrud, E. S., Espeland, S. H., Karlsbakk, E. E., Karlsen, Ø., van der Meeren, T., Moland, E., Sandlund, N., Sæther, B.-S., Sætra, I. M., & Svåsand, T. (2021). *Kunnskapsgrunnlag for mulig påvirkning fra oppdrettstorsk og levendelagret torsk på villtorsk*. https://munin.uit.no/handle/10037/22244

Bobe, J., & Labbé, C. (2010). Egg and sperm quality in fish. *General and Comparative Endocrinology* , *165* (3), 535–548. https://doi.org/10.1016/j.ygcen.2009.02.011

Bogevik, A. S., Natário, S., Karlsen, Ø., Thorsen, A., Hamre, K., Rosenlund, G., & Norberg, B. (2012). The effect of dietary lipid content and stress on egg quality in farmed Atlantic cod *Gadus morhua* . *Journal of Fish Biology* , *81* (4), 1391–1405. https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2012.03425.x

Braaten, B. (1984). Growth of cod in relation to fish size and ration level. *Flodevigen Rapportserie* , *1* , 677–710.

Cowan, M., Davie, A., & Migaud, H. (2011). The effect of combining shading and continuous lighting on the suppression of sexual maturation in outdoor-reared Atlantic cod, *Gadus morhua* . *Aquaculture*, *320*(1), 113–122. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2011.07.019

Dahle, R., Taranger, G. L., Karlsen, Ø., Kjesbu, O. S., & Norberg, B. (2003). Gonadal development and associated changes in liver size and sexual steroids during the reproductive cycle of captive male and female Atlantic cod (*Gadus morhua* L.). *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology* , *136* (3), 641–653. https://doi.org/10.1016/S1095-6433(03)00215-0

Dahlke, F., Puvanendran, V., Mortensen, A., Pörtner, H., & Storch, D. (2022). Broodstock exposure to warming and elevated $p\,CO_2$ impairs gamete quality and narrows the temperature window of fertilisation in Atlantic cod. *Journal of Fish Biology* , *101* (4), 822–833. https://doi.org/10.1111/jfb.15140

Davie, A., Porter, M. J., Bromage, N. R., & Migaud, H. (2007). The role of seasonally altering photoperiod in regulating physiology in Atlantic cod (*Gadus morhua*). Part I. Sexual maturation. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* , *64* (1), 84–97. https://doi.org/10.1139/f06-169

De Almeida, F. F. L., Andersson, E., Mittelholzer, C., Karlsen, Ø., Taranger, G. L., & Schulz, R. W. (2011). Pituitary gonadotropin and testicular gonadotropin receptor expression in Atlantic cod (*Gadus*

morhua L.) during the first reproductive season: Effects of photoperiod modulation. *General and Comparative Endocrinology* , *173* (1), 111–119. https://doi.org/10.1016/j.ygcen.2011.05.002

Dimitriou, E., Katselis, G., Moutopoulos, D. K., Akovitiotis, C., & Koutsikopoulos, C. (2007). Possible influence of reared gilthead sea bream (*Sparus aurata* , L.) on wild stocks in the area of the Messolonghi lagoon (Ionian Sea, Greece). *Aquaculture Research*, *38*(4), 398–408. https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2007.01681.x

Grefsrud, E. S., Andersen, L. B., Bjørn, P. A., Einar, B., Hansen, P. K., Husa, V., Karlsen, Ø., Olav, B., Samuelsen, O., Sandlund, N., & Stien, H. (2022). *Risikorapport norsk fiskeoppdrett 2022—Risikovurdering* (Nr. 2022–12; Rapport fra Havforskningen). Havforskningsinstituttet, IMR.

Hansen, T., Fjelldal, P., Folkedal, O., Vågseth, T., & Oppedal, F. (2017). Effects of light source and intensity on sexual maturation, growth and swimming behaviour of Atlantic salmon in sea cages. *Aquaculture Environment Interactions* , *9* , 193–204. https://doi.org/10.3354/aei00224

Hansen, T., Fjelldal, P. G., Yurtseva, A., & Berg, A. (2010). A possible relation between growth and number of deformed vertebrae in Atlantic salmon (Salmo salar L.). *Journal of Applied Ichthyology* , *26* (2), 355–359. https://doi.org/10.1111/j.1439-0426.2010.01434.x

Hansen, T., Karlsen, Ø., Taranger, G. L., Hemre, G.-I., Holm, J. C., & Kjesbu, O. S. (2001). Growth, gonadal development and spawning time of Atlantic cod *Gadus morhua* reared under different photoperiods. *Aquaculture* , *203* , 51–67.

Hansen, Ø. J., Puvanendran, V., & Mortensen, A. (2012). Importance of broodstock holding temperature on fecundity and egg quality in three groups of photo-manipulated Atlantic cod broodstock. *Aquaculture Research* , *44* (1), 140–150. https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2011.03018.x

Hliwa, P., Bah, M., Kuźmiński, H., Dobosz, S., & Ciereszko, A. (2014). Ultrasound evaluation of the gonadal structure in sex-reversed rainbow trout females. *Aquaculture International* , *22* (1), 89–96. https://doi.org/10.1007/s10499-013-9646-5

Hobson, V. J., Righton, D., Metcalfe, J. D., & Hays, G. C. (2007). Vertical movements of North Sea cod. *Marine Ecology Progress Series* , *347* , 101–110. https://doi.org/10.3354/meps07047

Huse, I., & Holm, J. C. (1993). Vertical distribution of Atlantic salmon (*Salmo salar*) as a function of illumination. *Journal of Fish Biology* , *43* (sA), 147–156. https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1993.tb01184.x

Jorde, P. E., van der Meeren, T., Quintela, M., Dahle, G., Mateos-Rivera, A., Aase, M., Norberg, B., Sævik, P. N., Bjørn, P. A., & Glover, K. A. (2024). Genetic analyses verify sexually mature escaped farmed Atlantic cod and farmed cod eggs in the natural environment. *Evolutionary Applications* , *17* (4), e13688. https://doi.org/10.1111/eva.13688

Jørstad, K. E., van der Meeren, T., Paulsen, O. I., Thomsen, T., Thorsen, A., & Svåsand, T. (2008). “Escapes” of Eggs from Farmed Cod Spawning in Net Pens: Recruitment to Wild Stocks. *Reviews in Fisheries Science* , *16* (1–3), 285–295. https://doi.org/10.1080/10641260701678017

Karlsen, O., & Holm, J.-C. (1994). Ultrasonography, a non-invasive method for sex determination in cod (*Gadus morhua*). *Journal of Fish Biology* , *44* (44), 965–971.

Karlsen, Ø., Holm, J. C., & Kjesbu, O. S. (1995). Effects of periodic starvation on reproductive investment in first-time spawning Atlantic cod (*Gadus morhua* L.). *Aquaculture*, *133*(2), 159–170. https://doi.org/10.1016/0044-8486(94)00399-9

Karlsen, Ø., Mittelholzer, C., Andersson, E., Norberg, B., & Taranger, G. L. (2014). Continuous light affects onset of puberty and associated changes in pituitary gonadotropin subunit transcript levels, and plasma estradiol-17 β and testosterone levels in Atlantic cod (*Gadus morhua* L.) females. *Aquaculture*, *424–425*, 95–103. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.12.029

Karlsen, Ø., Norberg, B., Kjesbu, O. S., & Taranger, G. L. (2006). Effects of photoperiod and exercise on growth, liver size, and age at puberty in farmed Atlantic cod (*Gadus morhua* L.). *ICES Journal of Marine Science* , *63* (2), 355–364. https://doi.org/10.1016/j.icesjms.2005.10.013

Kjesbu, O. S., Klungsøyr, J., Kryvi, H., Witthames, P. R., & Walker, M. G. (1991). Fecundity, atresia, and egg size of captive Atlantic cod (*Gadus morhua*) in relation to proximate body composition. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* , *48* (12), 2333–2343. https://doi.org/https://doi.org/10.1139/f91-274

Korsøen, Ø., Dempster, T., Fosseidengen, J., Karlsen, Ø., Oppedal, F., Stien, L., & Kristiansen, T. (2013). Towards cod without spawning: Artificial continuous light in submerged sea-cages maintains growth and delays sexual maturation for farmed Atlantic cod *Gadus morhua* . *Aquaculture Environment Interactions* , *3* (3), 245–255. https://doi.org/10.3354/aei00067

Kristiansen, T. S., Stien, L. H., Fosseidengen, J. E., Strand, E., & Juell, J.-E. (2011). Voluntary responses and limits of tolerance to pressure reduction and swimbladder expansion in farmed Atlantic cod. *Aquaculture International* , *19* (4), 625–636. https://doi.org/10.1007/s10499-010-9377-9

Ledoré, Y., Bestin, A., Haffray, P., Morvezen, R., Alix, M., Schaerlinger, B., Fontaine, P., & Chardard, D. (2021). Sex identification in immature Eurasian perch (*Perca fluviatilis*) using ultrasonography. *Aquaculture Research* , are.15465. https://doi.org/10.1111/are.15465

Migaud, H., Bell, G., Cabrita, E., McAndrew, B., Davie, A., Bobe, J., Herráez, M. P., & Carrillo, M. (2013). Gamete quality and broodstock management in temperate fish. *Reviews in Aquaculture* , *5* , S194–S223. https://doi.org/10.1111/raq.12025

Næve, I., Mommens, M., Arukwe, A., & Kjørsvik, E. (2018). Ultrasound as a noninvasive tool for monitoring reproductive physiology in female Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Physiological Reports* , *6* (9), e13640. https://doi.org/10.14814/phy2.13640

Pedersen, T., & Jobling, M. (1989). Growth rates of large, sexually mature cod *Gadus morhua* , in relation to condition and temperature during an annual cycle. *Aquaculture*, *81*(2), 161–168. https://doi.org/10.1016/0044-8486(89)90242-1

Puvanendran, V., Mortensen, A., Johansen, L., Kettunen, A., Hansen, Ø. J., Henriksen, E., & Heide, M. (2022). Development of cod farming in Norway: Past and current biological and market status and future prospects and directions. *Reviews in Aquaculture*, *14*(1), 308–342. https://doi.org/10.1111/raq.12599

Sandlund, N., Alix, M., Berg Andersen, L., Berg, E., Breistein, B., Bøhn, T., Heiberg Espeland, S., Geitung, L., Grefsrud, E. S., Jorde, P. E., Meier, S., van der Meeren, T., Skjæraasen, J. E., Skår, C.,

Strøm, J. F., Næverlid Sævik, P., & Karlsbakk, E. (2025). *Negative effekter på kysttorskbestander som følge av torskeoppdrett i åpne merder i sjø* (Nr. 2025–78; Rapport fra Havforskningen, s. 93). Havforskningsinstituttet, IMR.

Skjærven, K. H., Alix, M., Kleppe, L., Fernandes, J. M. O., Whatmore, P., Nedoluzhko, A., Andersson, E., & Kjesbu, O. S. (2024). Ocean warming shapes embryonic developmental prospects of the next generation in Atlantic cod. *ICES Journal of Marine Science* , *81* (4), 733–747. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsae025

Skjærven, K. H., Mommens, M., Adam, A.-C., Saito, T., Oveland, E., & Espe, M. (2022). Earlier or delayed seasonal broodstock spawning changes nutritional status and metabolic programming of growth for next-generation Atlantic salmon. *Aquaculture*, *554*, e738187. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738187

Skulstad, O. F., Karlsen, Ø., Fosseidengen, J. E., Kristiansen, T. S., Taranger, G. L., & Oppedal, F. (2013). Vertical distribution and sexual maturation in cage-farming of Atlantic cod (*Gadus morhua* L.) exposed to natural or continuous light. *Aquaculture Research* , *44* (6), 903–917. https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2012.03095.x

Somarakis, S., Pavlidis, M., Saapoglou, C., Tsigenopoulos, C. S., & Dempster, T. (2013). Evidence for «escape through spawning» in large gilthead sea bream *Sparus aurata* reared in commercial sea-cages. *Aquaculture Environment Interactions* , *3* , 135–152. https://doi.org/10.3354/aei00057

Svåsand, T., Jørstad, K. E., Otterå, H., & Kjesbu, O. S. (1996). Differences in growth performance between Arcto-Norwegian and Norwegian coastal cod reared under identical conditions. *Journal of Fish Biology* , *49* (1), 108–119. https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1996.tb00008.x

Taranger, G. L., Aardal, L., Hansen, T., & Kjesbu, O. S. (2006). Continuous light delays sexual maturation and increases growth of Atlantic cod (*Gadus morhua* L.) in sea cages. *ICES Journal of Marine Science* , *63* (2), 365–375. https://doi.org/10.1016/j.icesjms.2005.10.014

Uglem, I., Knutsen, Ø., Kjesbu, O., Hansen, Ø., Mork, J., Bjørn, P., Varne, R., Nilsen, R., Ellingsen, I., & Dempster, T. (2012). Extent and ecological importance of escape through spawning in sea-cages for Atlantic cod. *Aquaculture Environment Interactions* , *3* (1), 33–49. https://doi.org/10.3354/aei00049

van der Meeren, T., Jørstad, K. E., Paulsen, O. I., & Dahle, G. (2012). Offspring from farmed cod (*Gadus morhua* L.) spawning in net pens: Documentation of larval survival, recruitment to spawning stock, and successful reproduction. *ICES CM, Theme Session on “Genetic Impact of Aquaculture on Wild Populations”* , *P:11* , 1–12.

Vera, L. M., Davie, A., Taylor, J. F., & Migaud, H. (2010). Differential light intensity and spectral sensitivities of Atlantic salmon, European sea bass and Atlantic cod pineal glands ex vivo. *General and Comparative Endocrinology*, *165*(1), 25–33. https://doi.org/10.1016/j.ygcen.2009.05.021

HAVFORSKNINGSINSTITUTTET

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