

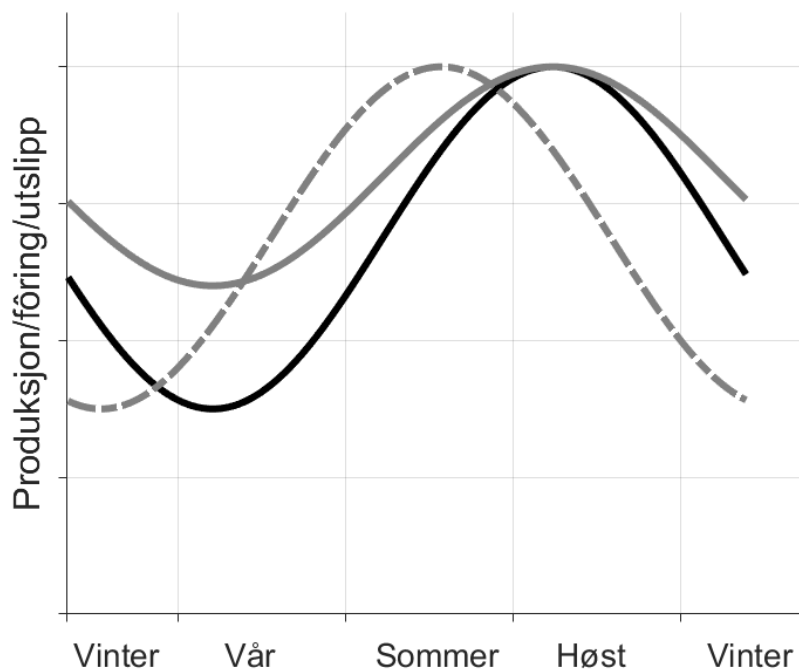
Rapport

Kunnskaps- og erfaringskartlegging om effekter av og muligheter for utnyttelse av utslipp av organisk materiale og næringsalter fra havbruk

Delrapport 4 - Klima

Forfatter(e)

Ole Jacob Broch, Matilde Skogen Chauton, Ingrid Ellingsen



SINTEF Ocean AS

Postadresse:
Postboks 4762 Torgarden
7465 Trondheim

www.sintef.no

Foretaksregister: NO 937 357 370 MVA

EMNEORD:

Klimaendringer, havbruk,
næringsalter, organiske
utslipp, matfisk, biologisk
produksjon

Rapport

Kunnskaps- og erfaringskartlegging om effekter av og muligheter for utnyttelse av utslipp av organisk materiale og næringsalter fra havbruk

Delrapport 4 - Klima

VERSJON
1

DATO
20. november 2020

FORFATTER(E)
Ole Jacob Broch, Matilde Skogen Chauton, Ingrid Ellingsen

OPPDRAGSGIVER(E)
FHF

OPPDRAGSGIVERS REFERANSE
Kjell Maroni

PROSJEKT
302005212

ANTALL SIDER OG VEDLEGG
25

SAMMENDRAG

Dette er delrapport IV i prosjektet "Kunnskaps- og erfaringskartlegging om effekter av og muligheter for utnyttelse av organisk material og næringsalter fra havbruk" finansiert av FHF (prosjektnummer 901572). Denne delrapporten tar for seg forhold knyttet til klimaendringer. Arbeidet er kvalitativt og belyser i generelle trekk de viktigste endringene i miljøbetingelser langs kysten som følge av klimaendringer.

Havet blir direkte påvirket av atmosfæriske klimaendringer ved at sjøtemperaturen stiger og at vannet blir surere. Samtidig har den globale oksygenkonsentrasjonen i havet sunket de siste seksti årene, og modeller antyder en betydelig videre nedgang innen 2100. Avhengig av andre lokale forhold vil dette påvirke forholdene for havbruk. Temperaturøkningen er raskere i nordlige områder enn lenger sør, og dette vil få konsekvenser for norskekysten. Studier antyder at den norske havbruksnæringen er sensitiv og lite tilpasningsdyktig til klimaendringer, mye på grunn av liten diversitet i produksjonen. En moderat temperaturøkning kan være en fordel, mens for høye temperaturer vil føre til dårlig vekst og død. Andre forhold som endrer seg med temperaturøkning er når, hvor og hvor mye ferskvann som tilføres kystfarvannene fra elver og land. Dette har betydning for algeoppblomstringer og planktondynamikk langs kysten, herunder skadelige algeoppblomstringer, og for lysforholdene i kystvannet. Dette påvirker forholdene for fisk i åpne sjøanlegg. Det er sannsynlig at produksjonssyklusen i sjøfasen vil bli kortere. Dette vil føre til endringer i profilen for utslipp av oppløste næringsalter og slam fra åpne sjøanlegg. Følgelig vil effektene av utslippene endre seg, og potensialet for å utnytte dem likeså.

Eksisterende modellsimuleringer av klimaet i havet langs norskekysten er for grove til å kunne brukes i lokale vurderinger av effekter av klimaendringer. Som følge av dette vet vi lite om konkrete verdier for temperaturendringer eller andre forhold som har innvirkning på fiskeoppdrett. Dette er et viktig kunnskapshull.

RAPPORTNUMMER
2020:01254

ISBN
978-82-14-06291-5

GRADERING
Åpen

GRADERING DENNE SIDE
Åpen



UTARBEIDET AV
Ole Jacob Broch

KONTROLLERT AV
Ida Beathe Øverjordet

GODKJENT AV
Ute Brønner

Historikk

VERSJON	DATO	VERSJONSBEKRIVELSE
0.1	2020-11-12	Versjon til kvalitetssikring
1	2020-11-19	Kvalitetssikret versjon

Innhold

1	Innledning	4
2	Klimaet i havet	4
2.1	Klimascenarier	4
2.2	Endring i sjøtemperatur	5
2.3	Forsuring av havvannet	7
2.4	Endring i nedbør og ferskvannsavrenning fra land	7
2.5	Endring i oksygenkonsentrasjonen	7
2.6	Endringer i primærproduksjon og forekomst av skadelige alger	7
2.7	Modeller og estimater for klimaendringer	8
2.8	Vekselvirkninger mellom samtidige påvirkningsfaktorer	10
3	Klimaendringer og forutsetninger for oppdrett	10
3.1	Sensitivitet og tilpasningsdyktighet til klimaendringer	11
3.2	Temperatur	11
3.3	Sykdom og parasitter	11
3.4	Oksygen	11
3.5	Forsuring	12
3.6	Strømforhold	12
3.7	Ressurstilgang	12
3.8	Flere samtidige faktorer	12
4	Utnyttelse av utslipp fra oppdrett	13
4.1	Landbasert oppdrett og lukkede anlegg	13
4.2	Havbruk i åpne anlegg	13
4.2.1	Utslipp	13
4.2.2	Effekter av utslipp under klimaendringer	15
4.2.3	Utnyttelse av utslipp fra havbruk	16
4.3	CO ₂ -utslipp fra havbruksnæringen og motvirkning av klimaendringer	17
5	Kunnskapsbehov	17
	Referanser	18

1 Innledning

Dette er delrapport IV i prosjektet “Kunnskaps- og erfaringskartlegging om effekter av og muligheter for utnyttelse av organisk material og næringsalter fra havbruk” finansiert av FHF (prosjektnummer 901572). Denne delrapporten tar for seg forhold knyttet til klimaendringer.

Det er ikke mulig å si noe om hvordan klimaendringer påvirker utslipp fra havbruk og utnyttelse av disse uten å utdype hvordan klimaet i havet langs norskekysten faktisk blir. Dermed er det lagt vekt på hvordan klimaendringene kan komme til å manifestere seg, og hvilke effekter dette kan komme til å ha på havbruk og utslippene fra havbruk. Dette blir gjort kvalitativt. Det er lite tilgjengelig informasjon som kan brukes til å kvantifisere dette presist.

Det er lagt vekt på å løfte frem kunnskapshull. Til tross for at klimaendringer blir oppfattet som en av de største truslene for norsk havbruksnæring¹ er kunnskapen om hva de vil komme til å bety begrenset. Det er også gjort relativt lite for å bedre kunnskapsgrunnlaget om hvordan norske kyst- og fjordområder blir påvirket av klimaendringer.

I denne utredningen blir det fokusert på oppdrett av laks med dagens teknologi. Ny teknologi kommer utvilsomt til å bidra til bedre effektivitet, mindre miljøpåvirkning og lavere klimautslipp i norsk havbruk. Ikke minst vil havbasert oppdrett kunne redusere noen av problemene som vil oppstå i mer kystnært oppdrett. Oppdrett av nye arter vil gi nye muligheter og kanskje føre til at enkelte av dagens problemer ikke lenger er relevante. Det er viktig å ha dette i bakhodet. Siden effektene av klimaendringer ikke blir kvantifisert presist her - dette er heller ikke mulig med dagens kunnskap - blir det ikke gjort noen videre vurdering av betydningen av nye arter eller ny teknologi. Det eneste unntaket er makroalger.

Disposisjonen er som følger. Først beskriver vi aspekter ved hvordan man tror klimaet i havet kommer til endre seg (kapittel 2). Dernest tar vi opp hvordan dette kan påvirke forutsetninger for havbruk med dagens teknologi (kapittel 3). I kapittel 4 diskuterer vi hvordan klimaeffektene kan påvirke potensialet for utnyttelse av havbruksutslippene. I det siste kapitlet (5) oppsummerer vi behovene for mer kunnskap om klimaendringer, oppdrett, utnyttelse og miljøeffekter.

2 Klimaet i havet

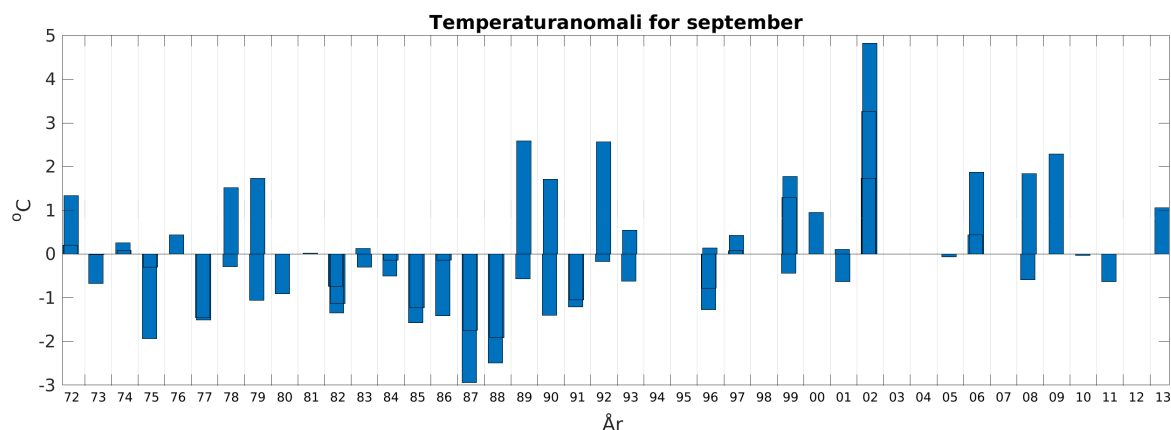
2.1 Klimascenarier

IPCC (the Intergovernmental Panel of Climate Change) benytter seg av flere klimascenarier. Disse tar utgangspunkt i ulike scenarier for utslipp av klimagasser i fremtiden og i hvilken grad vi (mennesker) makter å redusere disse utslippene eller aktivt å fjerne dem fra atmosfæren. Det er snakk om alle typer klimagasser, aerosoler og kjemisk aktive gasser, ikke bare CO₂. To av de mest brukte klimascenariene er RCP2.6 og RCP 8.5 (Meinshausen et al., 2011; IPCC, 2019). RCP står for “Representative Concentration Pathways”.

- RCP2.6 antar at utslippene av klimagasser fremover er lavt, samtidig med at det implementeres teknologier for karbonfangst og lagring. I dette scenariet viser modellsimuleringer at det er rundt 60 % sjanse for å holde global oppvarming innen 2100 på under 2 °C (i forhold til perioden 1850-1900).
- RCP8.5 antar at det ikke gjøres noen forente forsøk på å bekjempe global oppvarming eller å redusere klimagassutslippene. I dette scenariet fortsetter utslippene å øke, og det er 66 til 100 % sannsynlig at temperaturen innen 2100 er økt med mellom 3.2 og 5.4 °C.

De direkte følgene av økte klimagassutslipp til atmosfæren er økt temperatur og forsuring av sjøvannet.

¹Fiskeribladet, august 2020: Klimarisiko holder sjømatnæringen våken om natta. Sist besøkt: 10. november 2020.



Figur 1: Endringer i temperatur ved 10 m dyp ved Bud, en av Havforskningsinstituttets faste stasjoner ved kysten av Midt-Norge. Temperaturanomaliene er beregnet ved å trekke fra middel av alle målinger i september for perioden fra 1973 til 2015. Delvis overlappende søyler antyder ulike observasjoner.

2.2 Endring i sjøtemperatur

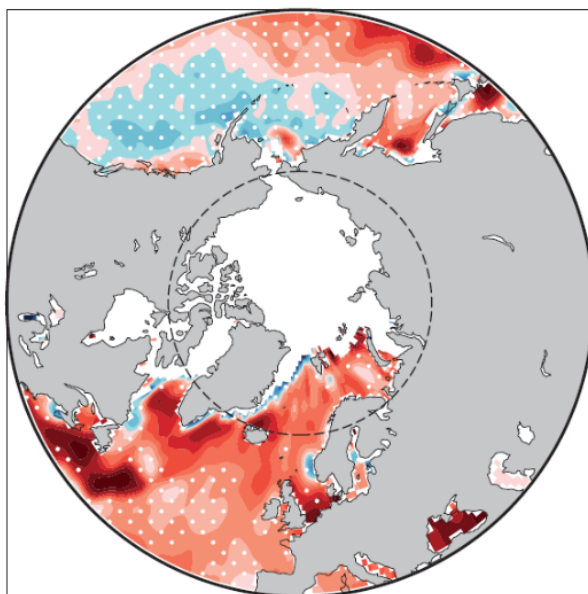
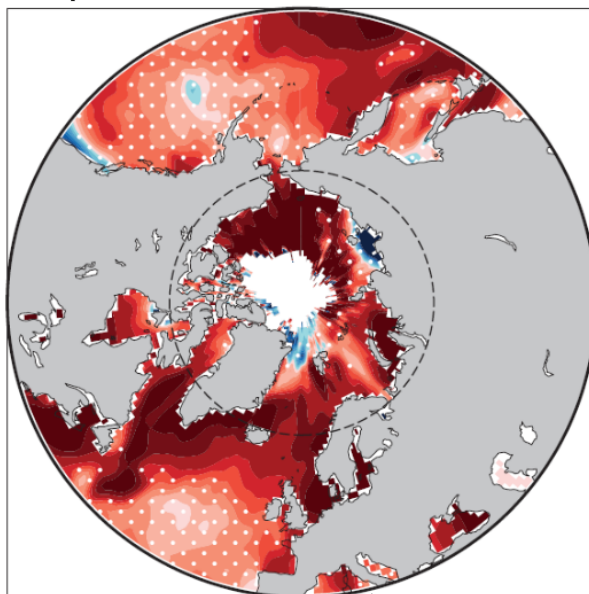
Økt atmosfæretemperatur vil naturlig gi en økt varmekraft til havet. Temperaturøkningen i havet går langsommere enn i atmosfæren på grunn av vannets høye varmekapasitet. Hvordan den vil fordele seg vil avhenge av stratifisering og vindforhold. I kystområdene er brakkvannslaget i fjorder kaldere enn kystvannet om vinteren, mens det om sommeren er varmere. Havforskningsinstituttet har flere faste hydrografiske stasjoner langs kysten av Norge fra Skagerrak til Finnmark. Målingene viser at sjøtemperaturen i kystvannet ved overflaten økte gjennom 1990- og 2000-tallet, og at trenden har avtatt de siste årene². Sjøtemperaturen langs kysten varierer naturlig både mellom år og over lengre tidsperioder og det kan være utfordrende å identifisere endringer som skyldes menneskeskapte klimaendringer. Det er derimot en klar trend med økende temperatur av Atlantisk dypvann i norske fjorder, og de siste årene (2011-2018) har observasjoner fra ARGO-bøyene vist at Norskehavet blir både varmere og ferskere (Mork et al., 2019). Disse endringene påvirker også forholdene langs kysten. Figur 1 viser at sjøtemperaturen målt i september ved Bud har en økende trend. Dette er et område hvor sokkelen er smal og den dynamiske fronten mellom kystvann og atlantisk vann ligger relativt nær kysten. Vannet i kyststrømmen er blandet med atlantisk vann³, og temperaturendringer i denne vannmassen vil også påvirke kystvannet. Denne innblandingen av atlantisk vann avhenger blant annet av vindretningen. Sørøstlige vinder som dominerer om vinteren gir downwelling langs kysten, det vil si nedblanding av overflatevann, og en generelt dypere og smalere kyststrøm. Om sommeren dominerer typisk nordøstlig vind som gir områder med upwelling, eller oppblanding av dypt vann til overflaten. Dette gir også en bredere og mindre dyp kyststrøm som potensielt kan gi økt utveksling av vann mellom kyst og fjordbassenger. Endringer i disse typiske vindmønstrene over tid vil ikke kun ha betydning for vanntemperatur, men kan også påvirke residenstiden til vannmasser i dype fjorder.

Arktisk forsterkning av temperaturøkning

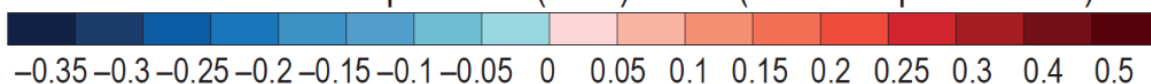
Temperaturen øker ikke jevnt over hele kloden. Observasjoner viser at temperaturøkningen går raskere i Arktiske områder enn ellers. Det er ikke konsensus blant forskere om hva som er årsaken, men nyere studier viser at økningen er stor i områder med betydelig reduksjon i isutbredelse og isutbredelse (Dai et al., 2019). Klimamodeller viser sterk økning i temperatur også utenfor kysten av Norge (figur 2). Dette er globale modeller og det er behov for mer fokuserte studier for å få mer kunnskap om hvordan klimaendringer vil påvirke lufttemperaturen i kystområder og hvordan det påvirker vindmønstrene.

²Havforskningsinstituttet, klimaet i havet: <https://www.hi.no/hi/temasider/hav-og-kyst/klimaet-i-havet/klimastatus/kysten>, sist besøkt: 10. november 2020.

³<http://www.coriolis.eu.org/>, sist besøkt: 10 november 2020

March SST trend

September SST trend


Sea surface temperature (SST) trend (units: °C per decade)



Figur 2: Figurene er tatt fra (Meredith et al., 2019), figur 3.3 a og c. De viser trenden i endring i temperaturen i havoverflaten (SST - Sea Surface Temperature) i mars (til venstre) og september (til høyre) måned for årene 1987-2017. Fargene angir endring i °C per tiår.

2.3 Forsuring av havvannet

Ettersom CO₂-konsentrasjonen i atmosfæren øker, absorberes mer CO₂ i havet, og konsentrasjonen av karbondioksid (CO₂) og bikarbonat (HCO₃) øker. Dette fører til at pH-verdien i vannet går ned, og vannet blir surere. Som med den arktiske forsterkningen i temperaturøkningen (se avsnitt 2.2), ser man også den raskeste endringen i havforsuring i Arktis (Tynan et al., 2016). Dette skyldes de arktiske vannmassenes relativt lave temperaturer og lave bufferkapasitet for oppløste gasser.

Det er en rekke organismer i havet som er sensitive til forsuring. Organismer som danner kalkskall er et godt eksempel, som for eksempel blåskjell og koraller (Børsheim and Golmen, 2009). Ved havforsuring vil disse organismene måtte bruke en større andel av energireservene sine på å opprettholde kalkskallet sitt. Andre viktige fysiologiske prosesser som fotosyntese kan også bli påvirket av forsuring og endringer i karbonsyrelikevekten og tilgang på CO₂. Lavere pH kan imidlertid for noen organismer være både en fordel og en ulempe (Connell et al., 2018), avhengig av andre miljøbetingelser (Gao et al., 2019). Det er derfor viktig å se havforsuring i sammenheng med endring av andre miljøbetingelser som temperatur, lys, næringstilgang og så videre.

2.4 Endring i nedbør og ferskvannsavrenning fra land

Global oppvarming vil også påvirke værforholdene i Norge. Klimamodeller viser at nedbørsmengden totalt sett ikke vil øke så mye, men det vil bli mer konsentrert i episoder med kraftig nedbør (Madsen et al., 2014). Det at selve nedbørssyklusen endrer seg vil påvirke lagdelingen av vannmassene langs kysten. Lagdelingen påvirker også temperaturen i overflatelaget. Ved sterk lagdeling og et tynt overflatelag vil de øvre vannmassene effektivt varmes opp eller kjøles ned. Det påvirker videre vindinduserte strømmer.

Ferskvannslaget har også betydning for tilgjengelig lys og næringssalt for planteplankton. Mer konsentrert ferskvannsavrenning vil føre til større erosjon slik at elvevannet som renner ut til kyst- og fjordstrøk vil bringe med seg næringssalter og partikulært materiale. Dette kan bidra til "formørking" av kystvannet, altså at lystilgangen reduseres. Dette vil påvirke primærproduksjonen, men også ha betydning for det marine økosystemet langs kysten i sin alminnelighet (Aksnes et al., 2009; Kyriliuk and Kratzer, 2019; McGovern et al., 2019; Deininger and Frigstad, 2019; Frigstad et al., 2020).

2.5 Endring i oksygenkonsentrasjonen

Observasjoner har vist at det totale oksygeninnholdet i havet har gått ned med rundt 2 % siden 1960 (Schmidt-ko et al., 2017). Nedgangen er global, med økning i noen få isolerte områder. Konsentrasjonen av oksygen i sjøvann henger blant annet sammen med temperaturen. Høyere vanntemperaturer fører generelt til lavere oksygenkonsentrasjon, og oksygennivåene kan dermed knyttes til klimaendringer, sammen med andre faktorer. Modellstudier antyder en ytterligere global nedgang i oksygeninnholdet i havet på opptil 7 % innen 2100 (Keeling et al., 2010). Endringer i oksygenkonsentrasjonen kan også skyldes andre årsaker av naturlig og antropogen art. Økt næringstilførsel til norsk kystvann har tidligere vært pekt som en mulig årsak til nedgangen i oksygenkonsentrasjonene (Johannessen and Dahl, 1996). Generelt er det en rekke andre faktorer som kan spille inn (Laffoley and Baxter, 2019). Det er åpenbart at lavere oksygenivåer i havet vil påvirke en rekke dyr negativt, men også mikro- og makroalger, som altså er netto produsenter av oksygen, kan påvirkes negativt fordi de er avhengige av oksygen i perioder der de respirerer (i mørket, ved høye temperaturer).

2.6 Endringer i primærproduksjon og forekomst av skadelige alger

Omtrent 50 % av den globale primærproduksjonen foregår i havet. Primærproduksjon innebærer fiksering av karbon (CO₂) gjennom fotosyntese og danner grunnlaget for så å si alt liv. Det er hovedsakelig planktonalger (mikroalger) og makroalger som står for den marine primærproduksjonen. For å realisere denne produksjonen er algene avhengige av næringssalter som nitrat og fosfat. En rekke andre stoffer i lavere konsentrasjoner som jern, magnesium og jod er også nødvendige.

Skadelige alger er en fellesbetegnelse for alger som enten skader fisk eller andre dyr mekanisk eller på andre måter ved å opptre i høyre konsentrasjoner eller er giftige (Masó and Garcés, 2006). Skadelige alger er

ofte til stede i små mengder gjennom hele året, og når forholdene ligger til rette kan de blomstre (Harmful Algal Blooms, HAB) og gi alvorlige effekter for eksempel på fisk i oppdrettsanlegg. Villfisk vil ofte ha større mulighet til å unnsnippe de høyeste algekonsentrasjonene enn fisk i en oppdrettsmerd.

Det er sannsynlig at sesongen for høy primærproduksjon forlenges som følge av klimaendringer (Moore et al., 2008), for eksempel gjennom økt temperatur og endring i næringssalttilgangen. Dersom dette skjer oppstår det flere mulighetsvinduer for skadelige alger enn i dag. Høyere vanntemperaturer kan flytte grenser for utbredelse og åpne nye nisjer for skadelige arter som foreløpig ikke finnes her.

Eutrofiering knyttes til trenden med flere og kraftigere blomstringer av skadelige alger som for eksempel *Phaeocystis* i kystnære områder av Nordsjøen (Davidson et al., 2014). Økt utslipp av slam og oppløste næringsalter fra fiskeoppdrett kan ha eutrofieringseffekter på lokale algesamfunn. Variasjoner i N:P-forholdene (forholdet mellom mengden nitrogen og fosfor) i slammet som følge av vekst- og produksjonssyklusen kan også påvirke primærproduksjonen i nærmiljøet og endre sammensetningen potensielt i retning av flere skadelige alger (Dahl et al., 2005). Havforsuring kan samtidig påvirke biotilgjengeligheten av næringsstoffer og samspillet mellom ulike arter. Den fisketoksiske algen *Chrysochromulina* hadde for eksempel større skadelig effekt på andre alger i forsøk med høyere pH, men man vet ikke om dette skyldes effekten av pH på vekstrater eller om pH påvirker toksinene (Schmidt and Hansen, 2001).

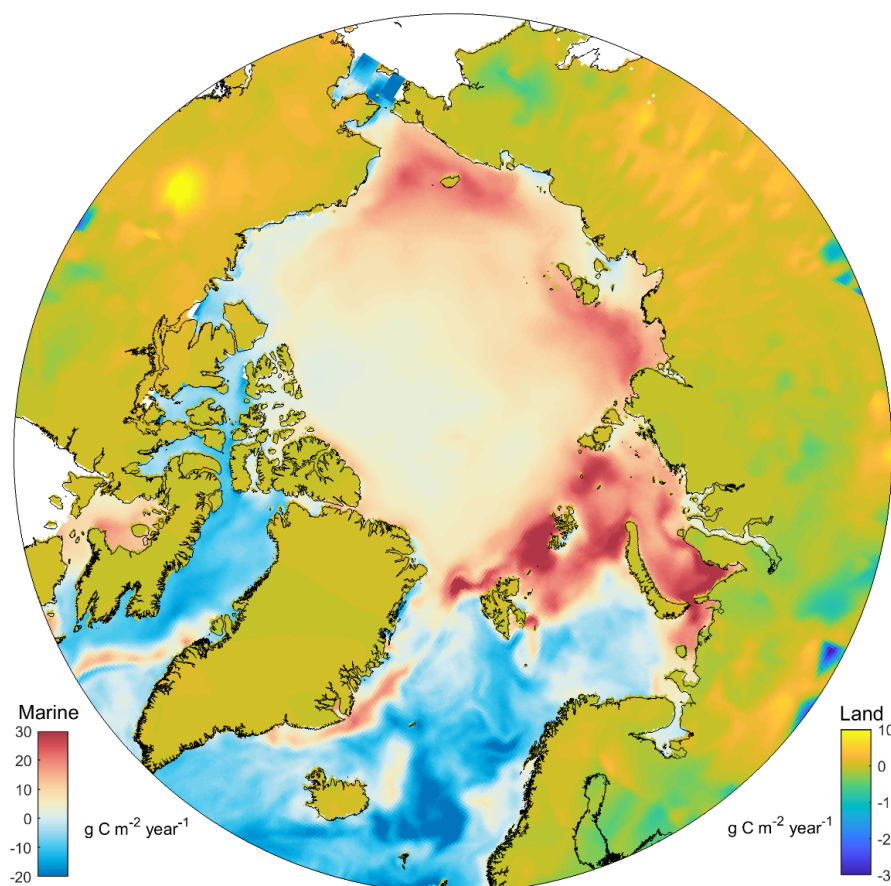
2.7 Modeller og estimater for klimaendringer

Klimamodeller er beregningsmodeller for atmosfæriske prosesser. De brukes til å estimere effekten av blant annet klimagasskonsentrasjoner i atmosfæren på lufttemperaturen (og andre variabler) (Meinshausen et al., 2011). Det er mange simuleringer fra mange modeller som danner grunnlag for IPCCs prognoser. Ingen av modellene vil enkeltvis kunne gi et helt riktig bilde av den fremtidige utviklingen. De forteller heller ikke nøyaktig hvordan fremtiden vil bli, men de angir en sannsynlighet for at ulike fenomener inntreffer, som for eksempel gjennomsnittlig atmosfæretemperatur i 2100. Fordelen med modeller er at de gjør oss i stand til å undersøke ulike scenarier - for eksempel hva som skjer om vi ikke er i stand til å redusere CO₂-utslippene. Modeller blir ofte kritisert for å være unøyaktige eller hvis de ikke "treffer" helt. Det er viktig å være kritisk til modellresultater, og man må spesielt være kritisk til antagelsene bak simuleringene. Men det er også viktig å ha et kritisk blikk på faktiske data fra observasjoner. Også her er metodikken viktig.

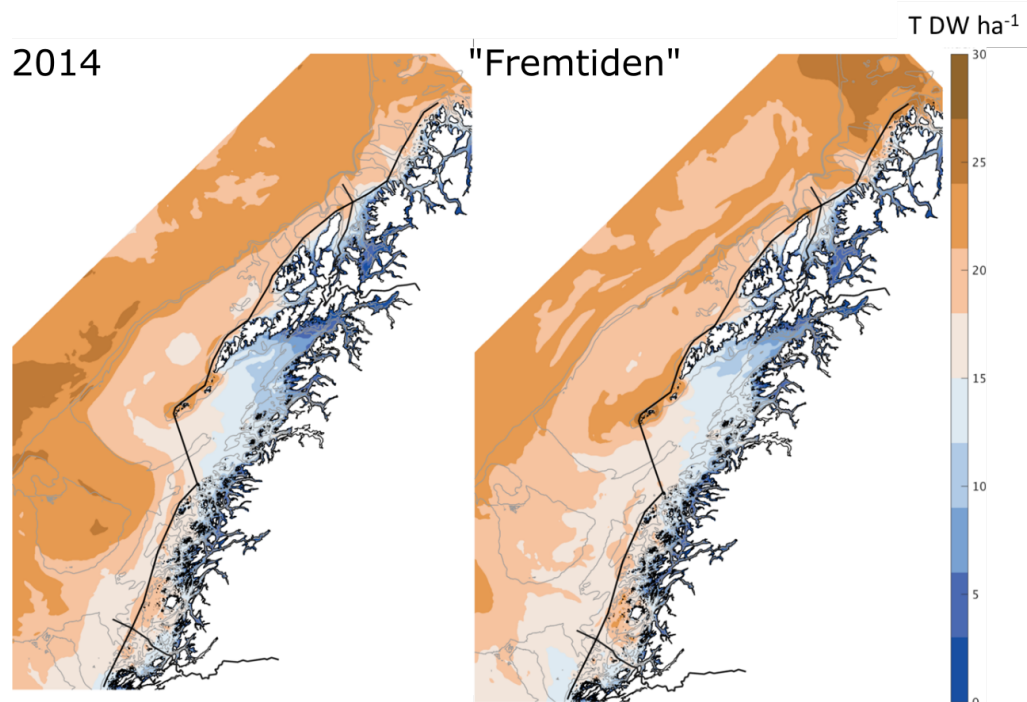
For å si noe om hvordan miljøet i havet påvirkes av den atmosfæriske temperaturøkningen, må man koble atmosfæremodeller med havmodeller. Dersom havmodellene kobler fysiske, kjemiske og biologiske prosesser, kan man også få indikasjoner om hvordan for eksempel den biologiske produksjonen kan komme til å endre seg (Ellingsen et al., 2008). Det er gjennomført en rekke modellstudier for Barentshavet og Arktis (Ellingsen et al., 2009; Slagstad et al., 2011) (figur 3), men detaljerte studier for norskekysten mangler.

Klimamodeller og ulike nedskaleringer har ulike bruksområder. Dersom modellene er for grove (ikke finmaskede nok), er det vanskelig å bruke dem til å vurdere lokale klimaeffekter (og behov for tilpasninger), og enda mindre på lokalitetsnivå (Reid et al., 2019a; Falconer et al., 2020). Resultatene i figur 4 er et godt eksempel. De to panelene viser, stort sett, det samme bildet. Ser vi nærmere på resultatene, er det imidlertid tegn til høyere produksjonspotensial for makroalger rundt Røst i "fremtiden" enn i "nåtiden" (representert ved 2014). Dette er fenomener som en grovere modell ikke kunne ha vist, fordi den ikke kan få frem prosesser på finere skala; landkonturene blir ikke beskrevet tilstrekkelig. Dette er en modellsimulering der biologiske prosesser er koblet med havfysikken, som igjen er koblet mot atmosfæriske prosesser. Det er blant annet fysiske forhold som vertikal blanding av vannmassene som spiller inn her. Vertikal blanding kan føre til økt tilgang til næringsalter, som dermed fører til økt vekst. Figuren illustrerer også hvordan flere variable vekselvirker og sammen kan føre til ikke-linære responser i et system.

Ulike modellverktøy brukes til å simulere effekter av for eksempel temperaturendringer (Gobler et al., 2017) og fra modellresultatene ser man hvordan nisjene for skadelige alger utvides. Man diskuterer samspillet mellom økologiske kontrollmekanismer og fysisk-kjemiske faktorer. For å øke presisjonen i modellverktøyene bør man innarbeide oppløsning/skaleringmuligheter og biologiske tilpasninger som for eksempel vertikal migrering eller annen adferd som påvirker algenes mulighet for å få tak i næringsstoffer fra slamutslipp og lignende (Wells et al., 2020).



Figur 3: Simulert fremtidig endring (frem til 2099) i marin og terrestrisk primærproduksjon som følge av klimaendringer (Ill.: Dag Slagstad, se for øvrig <https://www.ice-arc.eu/wp-content/uploads/2018/01/ICE-ARC-Highlights-brochure-English.pdf>). Som atmosfærisk pådrag er det tatt utgangspunkt i atmosfæretemperaturen fra et relativt optimistisk klimascenarior (RCP 2.6). Primærproduksjonen i havet er simulert ved hjelp av havmodellsystemet SINMOD (f.eks. (Slagstad and McClimans, 2005; Wassmann et al., 2019)).



Figur 4: Eksempel på nedskalering av atmosfæriske klimaprojeksjoner. Her er det gjort to simuleringer med det biofysiske havmodellsystemet SINMOD koblet med en vekstmodell for sukkertare (Broch et al., 2019). Fargene angir potensial for dyrking av sukkertare i tonn tørrstoff per hektar. Figuren til venstre viser resultatene fra en simulering der det er brukt atmosfæriske data for 2014. Figuren til høyre er basert på en tilsvarende simulering der lufttemperaturen i stedet er tatt fra et klimascenario som følger RCP8.5 (Slagstad et al., 2011). Det er antatt at temperaturøkningen vil øke med den nordlige breddegraden. Modelloppsettet som er brukt har 800 m horisontal oppløsning.

2.8 Vekselvirkninger mellom samtidige påvirkningsfaktorer

Et siste aspekt som bør fremheves er samtidig påvirkning fra flere faktorer. Et eksempel er organismer med kalkskall, som ved forsurening bruker mer energi på å vedlikeholde skallet, og som samtidig vil forbruke mer energi ved økte temperaturer. Laksefisk i åpne merder er et annet godt eksempel, siden lave oksygennivåer kombinert med høye temperaturer er uheldig. Effekten av to stressorer kan være verre enn “summen av enkelteffektene”. Flere samtidige påvirkningsfaktorer kan også være avgjørende for at enkelte endringer inntreffer (Sarà et al., 2018).

3 Klimaendringer og forutsetninger for oppdrett

Utslipp fra oppdrett og utnyttelse av disse er uløselig knyttet til forutsetninger for oppdrett langs norskekysten. Som vi har beskrevet ovenfor vil norske kyst- og havområder bli påvirket av klimaendringer både når det gjelder det fysiske, kjemiske og biologiske miljø. I dette kapitlet skal vi se på hvilken betydning klimaendringer kan ha spesifikt for oppdrett av laks. Vi må igjen ta utgangspunkt i den kunnskapen som foreligger. Det mangler generelt mye kunnskap om hvordan klimaendringer faktisk vil påvirke havbruksnæringen både når det gjelder Norge (Falconer et al., 2020) og verden for øvrig (Reid et al., 2019b).

3.1 Sensitivitet og tilpasningsdyktighet til klimaendringer

En nylig publisert studie (Blanchet et al., 2019)⁴ konkluderer med at innen europeisk havbruk er de nordiske landene spesielt sårbare for klimaendringer. Her er det primært temperatur som er klimadrivere. To av hovedgrunnene som løftes frem for Norden er temperatursensitiviteten til artene som produseres, og mangelen på diversitet (få arter er satt i produksjon). Dette siste spiller på næringens evne til endring og tilpasning, men også mer presis informasjon om hvilke endringer som vil gjøre seg gjeldende, hvor og når, har relevans her. Også når det gjelder landbasert akvakultur er de nordiske landene blant de mest sensitive. Her er sektoren i europeisk perspektiv også generelt mindre divers i den forstand at regnbueørret og karpe står for en stor del av produksjonen.

FNs mat- og landbruksorganisasjon (Food and Agricultural Organization of the United Nations, FAO) konkluderer også med at norsk havbruk er spesielt sårbart for klimaendringer (FAO, 2018). I tillegg er kapasiteten for tilpasning svært lav (ingen).

3.2 Temperatur

For lave temperaturer er sjelden et problem for laks. Temperaturer over 18°C kan føre til nedsatt appetitt, mens høy dødelighet oppstår ved lengre perioder med temperaturer på 23°C eller mer (Kullgren et al., 2013; Hvas et al., 2017). Spesielt i de sørligste produksjonsområdene er dette et problem i dag. Hvorvidt dette blir et økende problem her og lenger nord vil avhenge av hvordan ferskvannstilførsel og stratifisering endrer seg i disse områdene, og det foreligger ikke kunnskap om dette som vi kjenner til. Beveger vi oss lenger nord kan økte vanntemperaturer gi bedre produksjonsforhold. Dersom temperaturen blir betydelig høyere enn den optimale temperaturen for laks, kan det føre til en høyere økonomisk føfaktor, med en del åpenbare konsekvenser (Reid et al., 2019b).

3.3 Sykdom og parasitter

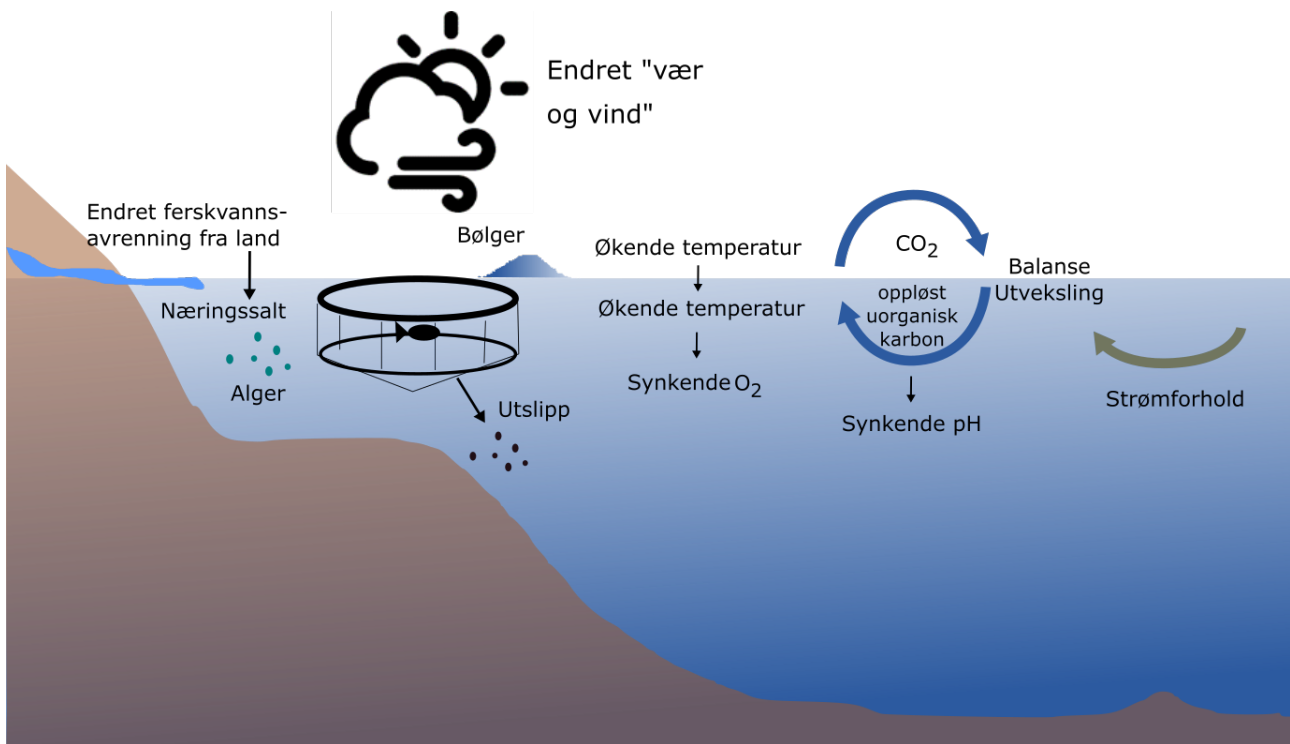
Temperatur er også viktig for spredning av lakselus og sykdommer. Det er velkjent at problemer med lus øker i sommerhalvåret. Økte temperaturer gir raskere utvikling av lus fra egg til smittsom kopepoditt og videre utvikling til kjønnsmodne hunnlus (Stien et al., 2005). Økt temperatur gir også større sannsynlighet for at lus setter seg på fisken. Økt temperatur og økt periode med høyere temperaturer kan dermed ha mye å si for det totale smittepresset i et område.

Et annet aspekt knyttet til sykdom og parasitter er at *tettheten* av lakseproduksjonen i en region påvirker smittepresset. Det er relativt lav tetthet av oppdrettsanlegg i nord og vanntemperaturene forventes å øke i større grad og bli høyere enn det som er optimalt i sør (figur 1), derfor er det grunn til å tro at deler av produksjonen vil bli flyttet nordover. Dette vil øke smittepresset fra parasitter og sykdom i nordlige regioner, i tillegg til at økte vanntemperaturer også der vil ha betydning (Vollset et al., 2020).

3.4 Oksygen

Oppløselighet av gasser henger tett sammen med temperatur. Oksygenforholdene er knyttet til forbruk og produksjon av oksygen i vannmassene, og utveksling med atmosfæren. Generelt er oksygennivåene høye i norske fjord- og kystområder. Høyere temperaturer gir lavere oksygeninnhold, men hvordan klimaendringer vil kunne påvirke oksygeninnhold i øvre vannlag i norske kyststrøk er ikke kjent. Dette er en viktig problemstilling i forhold til valg av gode oppdrettslokaliteter og kjennskap til endringer som ikke ligger langt frem i tid er svært relevant. Det er for eksempel kjent at det i perioder er kritisk lave oksygenivå ved enkelte lokaliteter. Om dette skyldes en kombinasjon av fiskens forbruk og lite vannutskiftning eller om det også kan skyldes variasjon i de naturlige forholdene er ikke kjent. En kraftig blomstring av mikroalger kan påvirke oksygenivået lokalt. Dette skjer fordi algene produserer oksygen når de er fotosyntetisk aktive om dagen samtidig med at de respirerer og forbruker oksygen hele døgnet, spesielt om natten. Når blomstringen avtar og biomassen begynner å brytes ned

⁴Artikkelen er publisert innen et EU-prosjekt om klimaendringer og sjømatproduksjon, ClimeFish (<https://climefish.eu/>).



Figur 5: Illustrasjon av noen av de viktigste variablene for fiskeoppdrett som blir påvirket av klimaendringer.

ved mikrobiell aktivitet, så vil også oksygenforbruket lokalt øke. Oksygennivået har også potensielt effekter på gjellesykdom hos laks (Fisk et al., 2002).

3.5 Forsuring

Økt CO₂-konsentrasjon i havet og medfølgende forsuring (se avsnitt 2.3) har konsekvenser også for oppdrettsarter. Dette gjelder ikke bare fisk og skaldyr, men også alger (Ellis et al., 2017; Reid et al., 2019b). Høye CO₂-konsentrasjoner kan ha betydning for gjellefunksjon hos smolt og post-smolt (Seidelin et al., 2001).

3.6 Strømforhold

Siden det ikke er gjort detaljerte/høyoppløste studier på temaet er det vanskelig å si konkret hvordan strømforholdene vil endre seg på de lokalitetene og i de produksjonsområdene vi har i dag. Som nevnt i avsnitt 2.4 er det ikke usannsynlig at strømforholdene vil endre seg. Både strømfart og temperatur har betydning for kvalitet, velferd og overlevelse hos laks (Hvas et al., 2017; Remen et al., 2016).

3.7 Ressurstilgang

Globale klimaendringer kan ha direkte innvirkning på betingelsene for fiskeoppdrett i Norge, for eksempel ved at tilgangen på fôrråvarer blir endret. Det inngår mange ulike fiskeslag i dagens fiskefôr (Winther et al., 2020). Tilgangen på ulike råvarer vil dermed kunne endres som følge av klimaendringer.

3.8 Flere samtidige faktorer

Høyere temperaturer og næringssaltkonsentrasjoner kan være positivt for dyrking av makroalger (f.eks. tang, tare, søl og havsalat, figur 4). Samtidig vil disse miljøvariablene kunne føre til økt beiting på de dyrkede algene. Resultatene fra en japansk studie viste at mens økt temperatur eller næringssaltkonsentrasjon isolert sett førte

til dobling i beitingen på dyrkede makroalger, førte økt temperatur og næringssaltkonsentrasjon til en tredobling i beitingen (Endo et al., 2020). Dette illustrerer at man ikke alltid kan “addere” eller “multiplisere” effektene av enkeltvariabler for å finne den kombinerte effekten av samtidige endringer.

4 Utnyttelse av utslipp fra oppdrett

Utnyttelse av utslipp fra akvakultur blir beskrevet i delrapport 3. Har tar vi opp noen aspekter knyttet til dette som kan bli påvirket av klimaendringer.

4.1 Landbasert oppdrett og lukkede anlegg

I fullstendig lukkede, landbaserte anlegg vil antagelig klimaendringer ha mindre betydning enn i sjøanlegg. Dette avhenger imidlertid av i hvilken grad produksjonen er avhengig av inntak av vann fra ulike ferskvanns- og saltvannskilder, og i hvilken grad dette vannet må oppvarmes eller avkjøles. Teknologi og muligheter for utnyttelse av utslipp fra landbasert oppdrett blir beskrevet i delrapport 3.

Det finnes ulike teknologier for biologisk produksjon basert på avløpsvann fra landbaserte akvakulturanlegg. Både oppløste og partikulære utslipp kan utnyttes. Grønnalgen *Chlorella* kan dyrkes i N/P-rikt-avløpsvann med høy opptakseffektivitet (Hawrot-Paw et al., 2020) og det utføres forsøk med ulike alger og avløpsvann fra ulike fiskeslag (Tossavainen et al., 2019). Det finnes også mye erfaring med dyrking av makroalger i avløpsvann fra ulike former for fiskeoppdrett (Neori et al., 2004; Ghaderiardakani et al., 2019; Neori et al., 2019). Utfordringer knyttet til klimaendringer her vil potensielt være høyere temperaturer, men i noen tilfeller vil det å dyrke i et integrert anlegg kunne avhjelpe problemer med raske temperaturendringer (Figueroa et al., 2009). Temperaturen i lukkede sjøanlegg vil følge den omkringliggende vanntemperaturen og til dels miljøbetingelsene i havet. Dermed kan man anta at mange av de samme faktorene som påvirker åpne sjøanlegg vil ha betydning også for lukkede sjøanlegg, selv om for eksempel smittepresset fra lakselus og sykdommer kan antas å være lavere enn i åpne anlegg.

4.2 Havbruk i åpne anlegg

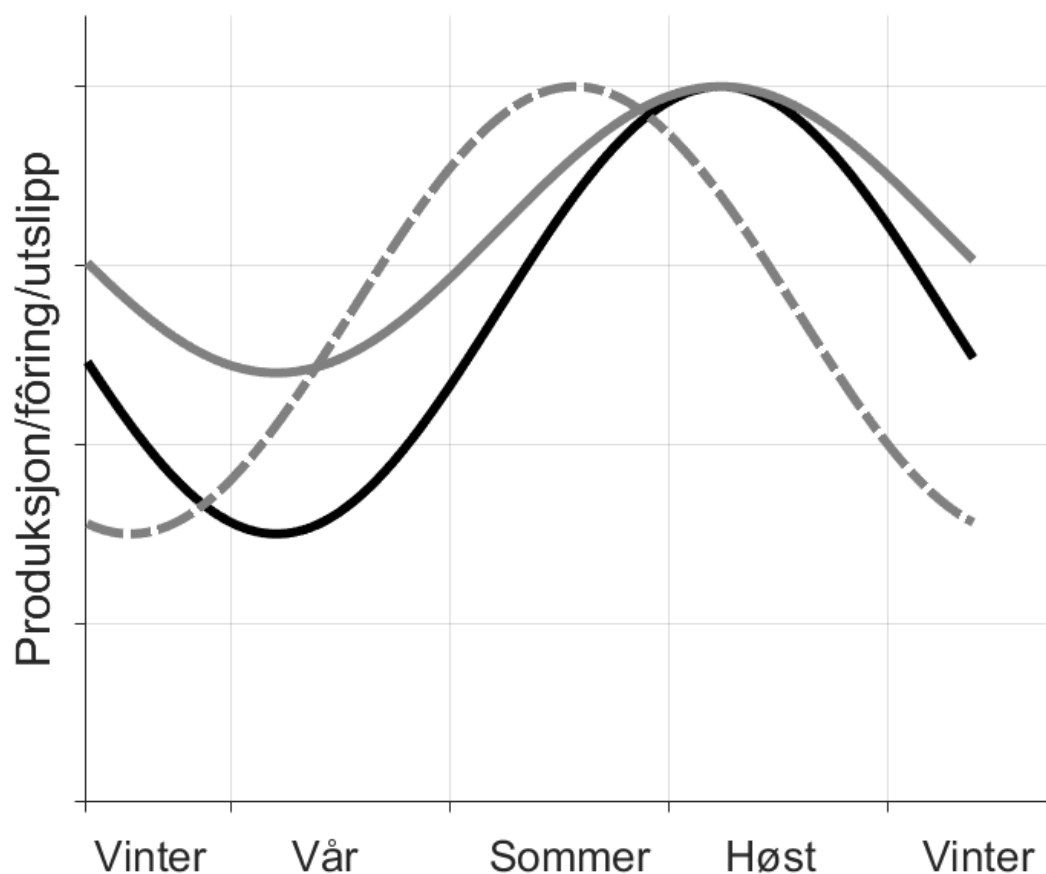
4.2.1 Utslipp

Hovedsakelig benyttes i dag åpne merder i sjø i utvekstfasen i norsk fiskeoppdrett. Utslippene fra norsk havbruksnæring i dag (2019) er beskrevet i delrapport 1. Utslippsratene henger sammen med fôringsintensiteten, som videre henger sammen med størrelse på fisken, total biomasse og vanntemperaturen. I svært grove trekk vil utslippene for et større område, for eksempel hele landet eller et produksjonsområde, følge den sesongmessige variasjonen i vanntemperaturen (Wang et al., 2012). Dette gjelder både partikulært og oppløst material.

Endringer i vanntemperaturen vil føre til endrede fôrings- og utslippsrater (figur 6). Ser vi alle anleggene i for eksempel et produksjonsområde under ett, og dersom vi kun vurderer endringer som følge av temperatur, er det et par ting som kan komme til å skje.

- Økende temperaturer kan føre til at “toppen” i utslippene kommer tidligere enn i dag.
- Dersom temperaturen gjennomgående øker, vil utvekstfasen blir kortere, og utslippene vil bli mer konsentrert i tid, eller den totale sesongmessige variasjonen vil bli mindre.

Globale klimaendringer kan ha direkte innvirkning på betingelsene for fiskeoppdrett i Norge, for eksempel ved at tilgangen på fôrråvarer blir endret. Dette har betydning for sammensetningen av fôret, for fordøyeligheten og dermed også sammensetningen av og egenskapene til de partikulære utslippene.



Figur 6: Konseptuell/kvalitativ fremstilling av hvordan fremtidig temperaturøkning kan komme til å påvirke det sesongmessige utslippet av partikulært material eller oppløste næringssalter fra åpne sjøanlegg i et produksjonsområde eller region. Den *sorte* kurven representerer dagens situasjon. Hvordan utslippene varierer over tid stemmer grovt sett med utslippsprofilene i delrapport 1 "Kvantifisering av utslipp", men dette vil ikke nødvendigvis representere et enkelt anlegg. Vi ser at utslippet er lavest tidlig om våren, tar seg opp gjennom sommeren og er størst sent på sommeren eller tidlig på høsten. Den *heltrukne, grå* kurven representerer et mulig fremtidsscenario der det er relativt mindre sesongvariasjon. Dette vil kunne skje dersom vanntemperaturen øker om vinteren og våren og det dermed blir en jevnere tilvekst på matfisk i sjø. Den *stiplede, grå* kurven representerer en annen mulighet. Her er temperaturen høyere om våren og sommeren, slik at produksjonen i denne perioden blir relativt høyere. Et slikt scenario vil også kunne oppstå dersom temperaturen om våren og sommeren øker, mens temperaturen på sensommeren og høsten potensielt blir for høy for god tilvekst. Se også figur 1.

4.2.2 Effekter av utslipp under klimaendringer

Det er ikke enklere å oppsummere miljøeffektene av utslipp under klimaendringer enn under dagens forhold. Vi beskriver kort noen aspekter knyttet til effekter av utslipp under klimaendringer med blick til delrapport 2. Se for øvrig referansene der.

Effekter av og på begroing Frigjøring av begroingsorganismer ved notvask kan betraktes som et organisk utslipp fra havbruk (delrapport 2). Veksten og biomassen av groe på et oppdrettsanlegg er avhengig av temperatur og lysintensitet. Økte temperaturer vil føre til raskere vekst, og det vil være behov for hyppigere notvask, muligens til andre tidspunkt enn i dag. Utslippene vil i denne forstand øke. Spesielt oppdrettsanlegg i nord, der temperaturøkningen er høyest, vil merke effekten av dette. Dette vil ikke bare føre til økt ressursbruk, men kan også påvirke kvalitet og helse hos fisken.

Oppløst organisk og uorganisk næringsstoff Effekten av oppløst organisk material er vurdert i delrapport 2. Omsetningstiden for disse stoffene er relativt lang. Ved økte temperaturer vil denne omsetningstiden gå ned, men det er vanskelig å vurdere om dette er av stor betydning.

Utslipp av næringsstoffer fra akvakultur sees på som en eutrofieringsprosess som påvirker økosystemet og primærproducentene lokalt, og temaet har blitt undersøkt parallelt med utviklingen av havbruk (Pruder, 1986). Planteplankton er dessuten en veldig viktig brikke i marine økosystem og man bygger opp kunnskap om klimaendringer og effekter på primærproduksjon (Käse and Geuer, 2018). Oppløst uorganisk material fra fiskeoppdrett er høyt biologisk tilgjengelig. Effekten av oppløst uorganisk material vil henge sammen med tilstanden i økosystemet for øvrig (Olsen et al., 2014). Under lysbegrensede forhold vil ikke vekst hos primærprodusenter bli påvirket nevneverdig. Når våroppblomstringen starter, vil høyere temperaturer kunne føre til raskere vekst, og dermed også en raskere omsetning av både naturlig tilførte og antropogene næringsstoffer.

Algesamfunn og primærproduksjon nær oppdrettslokaliteter blir studert jorda rundt (Navarro et al., 2008; Wang et al., 2009; Bartozek et al., 2014; Bandpei et al., 2016) og et studium fra det Østersjøen viste at planktonisk klorofyll økte betydelig i nærheten av oppdrettslokaliteter og var den tydeligste indikatoren for økt næringstilførsel (Honkanen and Helminen, 2000). Et studium fra Adriaterhavet viste at det var mer planteplanktonbiomasse på en oppdrettslokalitet spesielt i sommersesongen, men artssammensetningen ble styrt av sesongsuksessjon (Skejic et al., 2011). I et kinesisk feltstudium undersøkte de hvordan temperaturøkning i vannet (fra utslipp av varmt vann fra kraftproduksjon) og utslipp av næringsstoffer fra oppdrett samvirket på planteplankton i området, og fant at i kalde årstider kunne det indusere oppblomstring av den skadelige dinoflagellaten *Prorocentrum minimum* (Jiang et al., 2013). Man diskuterer også om utslipp fra akvakultur har effekter over større områder, både i utstrekning fra et enkelt anlegg (Tsagaraki et al., 2013), men også i større områder der antallet oppdrettsanlegg øker (Sarà et al., 2011). Noen steder har man ikke kunnet påvise høye næringsstoffkonsentrasjoner eller økning i klorofyll i nærheten av oppdrettsanlegg (Neofitou and Kilaoudatos, 2008; Jansen et al., 2018), men ved nærmere studier har man i noen tilfeller funnet at årsaken kan være rask effekt av beitere som holder planteplanktonet nede og overfører næringsstoffene oppover i næringskjeden (Pitta et al., 2009).

Hvorvidt oppløste, uorganiske næringsstoffer har en entydig effekt på oppblomstring av skadelige alger er ikke klart. Under videre klimaendringer er denne sammenhengen heller ikke klar.

Resultater fra modellsimuleringer tyder på at den pelagiske primærproduksjonen kan komme til å gå ned i deler av Norskehavet ved fortsatte klimaendringer (figur 3). Dette har (i modellen) sammenheng med mengden tilgjengelig næringsstoff i den fotiske sonen (0 - 50 m dyp). Tilgangen på næringsstoffer er i dag begrensende for primærproduksjonen langs deler av norskekysten, og dersom dette blir enda tydeligere under videre klimaendringer, kan utslipp fra havbruksnæringen også kunne ha positive effekter.

Partikulært organisk material Selv om vannstrømmer potensielt kan transportere partikulært organisk material fra oppdrettsanlegg opp mot et par kilometer bort fra anlegget, vil størstedelen av massen bli deponert på bunnen rett under eller rett i nærheten av anlegget (Broch et al., 2017; Woodcock et al., 2018). Både på bunnen

og i suspensjon vil dette organiske materialet interagere både med filtrerende makroorganismer og mikroorganismer. Det er grunn til å tro at *intensiteten* i utslippet og overvåkning av bunnforholdene vil fortsette å ha stor betydning for effektene av disse utslippene.

4.2.3 Utnyttelse av utslipp fra havbruk

Vi kommer her til å fokusere utelukkende på utnyttelse av utslipp til biologisk produksjon. Dette innebærer med andre ord en eller annen form for kultivering av en eller flere organismer i tillegg til laks som kan nyttiggjøre seg en eller flere av de komponentene som slippes ut.

Biologisk produksjon Generelt kan man si at de fleste marine biologiske prosesser vil gå raskere dersom vanntemperaturen øker (sjøpattedyr utgjør selvfølgelig et viktig unntak). Hvor mye dette har å si for biologisk produksjon varierer imidlertid siden mange organismer vokser og trives best innen et visst temperaturintervall. Blir temperaturen for høy, vil det gå utover effektiviteten av omsetningen av avfallsstoffer. Dette gjelder også blant fotosyntetiserende organismer, som vil kunne respirere mer karbon enn de produserer dersom temperaturen blir for høy.

Dersom man ønsker å utnytte de faktiske utslippene fra åpne oppdrettsanlegg i sjø, må man gjøre dette relativt tett på oppdrettsanlegget (Broch et al., 2017; Jansen et al., 2018; Fossberg et al., 2018). Hvis ikke vil materialet bli omsatt i økosystemet underveis. Man kan tenke seg å utnytte ressurser i en region fra et *massebalanseperspektiv* der et utslipp på X tonn av et stoff kompenseres med produksjon av en eller flere arter som tar opp X tonn av det samme stoffet, men ikke nødvendigvis det som er sluppet ut. Dette vil ikke nødvendigvis føre til noen ekstra fordeler som spesielt bra vekst eller kvalitet, for eksempel ved utnyttelse av spesielt attraktive fettstoffer i fiskefekalier. Det vil imidlertid føre til en balansering av utslipp og ekstraksjon i en region/et område.

Både hetero- og autotrofe organismer forbruker oksygen. Alger og planter produserer i vekstperioden netto mer oksygen enn de forbruker, men også disse vil i perioder forbruke mer enn de produserer. Høyere temperaturer kan føre til økt respirasjon og mindre effektiv energiomsetning. Dette kan føre til høyere oksygenkonsum, som sammen med de generelt synkende oksygennivåene (Schmidtke et al., 2017) potensielt kan føre til problemer i fiskeoppdrett. Derfor er det viktig at arter, biomasse og funksjonelle grupper i ulike produksjonssystemer balanseres, spesielt i et klimaperspektiv.

Diversitet og IMTA Norsk akvakulturproduksjon består i hovedsak av laks og regnbueørret. Blanchet et al. (2019) nevner manglende diversitet innen den norske akvakulturindustrien som en faktor som gjør industrien mer sårbar for klimaendringer. Reid et al. (2019a) trekker også frem diversifisering som en av flere måter å tilpasse seg klimaendringer på. Ved å produsere flere arter spres risikoen.

Diversifisering på lokalitetsnivå kan oppnås for eksempel gjennom *integrert multitrofisk akvakultur* (IMTA). IMTA går ut på å produsere minst to arter sammen, på ulike trofiske nivåer, der den ene kan utnytte avfallsproduktene fra den andre til vekst (Neori et al., 2004; Chopin et al., 2012). For eksempel kan blåskjell eller kamskjell utnytte partikulære organiske utslipp fra lakseoppdrett (Chopin et al., 2012; Handå et al., 2012; Bergvik et al., 2019), mens tare og andre makroalger kan utnytte de oppløste uorganiske utslippene (Handå et al., 2013; Broch et al., 2013; Fossberg et al., 2018). I denne sammenhengen kalles da laksen for *driverarten*, som her er det leddet i systemet der det tilføres fôr. IMTA brukes som regel om systemer der de filtrerende (f.eks. blåskjell) eller ekstraherende (f.eks. sukkertare) artene er satt ut med hensikt. Det finnes imidlertid et utall varianter av IMTA, og man kan også tenke seg systemer der man aktivt høster av naturlige forekomster som tilføres fôr fra oppdrettsanlegget, for eksempel børstemark under lakseoppdrettsanlegg (Jansen et al., 2019). Et viktig prinsipp er imidlertid at avfallsressursen (lakseskitt eller oppløst uorganisk nitrogen) må passere (minst) et trofisk nivå i et IMTA-system. For eksempel bidrar ammonium fra respirasjonen hos laks til å realisere primærproduksjon i makroalger (nivå 0 til nivå 1).

I tillegg til direkte og indirekte å utnytte fôrressursene i lakseoppdrett, bidrar IMTA til diversifisering av

oppdrettsnæringen gjennom produksjon av flere arter. Polykulturer kan også bidra⁵ til diversifisering. Monokulturer av flere arter er selvfølgelig også en mulighet. Generelt kan man si at diversifisering er et av flere mulige tiltak for å redusere sårbarheten for klimaendringer.

4.3 CO₂-utslipp fra havbruksnæringen og motvirkning av klimaendringer

Selv om det ikke er hovedtema for denne utredningen er det relevant å nevne havbruksnæringens egne klimagassutslipp. Oppdrett av fisk og andre organismer bidrar naturligvis til klimagassutslipp på lik linje med så å si alle andre aktiviteter. Som alle andre næringer har dermed også havbruksnæringen et ansvar for å redusere utslippene sine. En nylig publisert studie av klimagassutslippene fra norsk sjømatproduksjon (Winther et al., 2020) peker på en rekke områder innen lakseoppdrett med potensial for utslippsreduksjoner. I tillegg til økt energieffektivitet og førutnyttelse er utnyttelse av ulike restråstoffer eller biprodukter fra lakseoppdrett et viktig aspekt. En mulig forlengelse av dette er utnyttelse av både næringssalter og fekalier fra lakseoppdrett. Bioproduksjon basert på utslipp fra lakseoppdrett vil kunne erstatte annen biomasse produsert med større CO₂-utslipp.

Et aspekt ved IMTA med tare og laks som er svært interessant, men som sjelden trekkes frem, er muligheten for å fjerne CO₂ fra atmosfæren via tareoppdrett. Tare tar opp oppløste næringssalter fra sjøen, inkludert eventuelle utslipp fra fiskeoppdrett, samtidig som den binder CO₂ gjennom fotosyntese. Dersom taren høstes og brukes i ulike produkter, inkludert i dyrefôr og menneskeføde, vil dette CO₂et slippes ut igjen. På denne måten bidrar tarekulturene til å omsette CO₂. Men i løpet av vekstsesongen vil også tarefragmenter løsne og falle av. Estimater fra Kina antyder at karbon tilsvarende 61 % av karbonmassen som høstes i dyrket tarebiomasse i tillegg slippes ut som fragmenter og hele planter i løpet av dyrkingssesongen (Zhang et al., 2012)⁶. Dette karbonet vil synke inn i sedimenter og potensielt kunne bli fraktet langt avgårde og deponeres på store dyp (Duarte et al., 2017; Filbee-Dexter et al., 2020), og ikke bli tilbakeført til atmosfæren på lang tid. Dette er i så fall et *klimapositivt* bidrag - det bidrar til å redusere CO₂-konsentrasjonen i atmosfæren og i havet.

Dyrking av makroalger har også en annen positiv effekt på miljøet. Algene bidrar til å motvirke surt havmiljø (høye CO₂-konsentrasjoner), og kan bidra til at blåskjell eller andre organismer med kalkskall får bedre vekst og sterkere skall (Fernández et al., 2019). Denne effekten inntreer uavhengig av om algene bidrar til netto eksport av karbon eller ei.

5 Kunnskapsbehov

Her nevner vi noen viktige områder der det bør utvikles og gjennomføres forskningsprosjekter for å øke kunnskapen om effekter av klimaendringer på betingelser for havbruk og effekter av og på utslipp fra havbruk. Dette er ikke en uttømmende gjennomgang.

Klimaprojeksjoner for norskekysten og på lokalitetsnivå

De eksisterende klimanedskaleringene for norskekysten er for grove til å være nyttige på lokalt eller lokalitetsnivå (Falconer et al., 2020). Derfor er det et behov for bedre og mer detaljert kunnskap om hvordan klimaendringer lokalt vil påvirke forholdene langs norskekysten. Hvordan forholdene vil endre seg ved enkeltlokaliteter har stor betydningen for produksjonsplanlegging og forvaltning. Med tanke på vekst i næringen er regionale og lokale studier av klimapåvirkning på fysiske og biologiske forhold særdeles viktige. Høyoppløste havmodeller (figur 4) kan brukes til å gi nyttige perspektiver på viktige variabler som temperatur, bølger, strømforhold, oksygen og hvordan disse påvirkes av atmosfæriske klimaendringer. Klimanedskaleringene er helt nødvendige som grunnlag for videre forskning på alle andre klimaeffekter på norsk havbruk.

⁵Dette er ikke det samme som IMTA fordi polykulturer dreier seg om oppdrett av flere arter, men ikke nødvendigvis fra ulike trofiske nivåer.

⁶Resultater fra forskningsprosjektet KELPPRO (finansiert av Norges Forskningsråd, www.kelppro.net) antyder at dette tallet kan være mye lavere under norske forhold. Se Fieler, Greenacre, Matsson, Neves, Forbord m. fl. (under utarbeidelse).

Sykdom og parasitter

Endring av miljøbetingelsene og strømforholdene vil gi nye mønstre for smittespredning av virus og parasitter mellom oppdrettsanlegg. Vanntransporten endres og økte temperaturer vil gi kortere utviklingstid for lakselus, for å nevne noe. Nye sykdommer og parasitter kan bli et problem. Det er behov for forskning for å undersøke dette nærmere.

Skadelige alger og andre problematiske organismer

Økt kunnskap om skadelige alger er viktig både med tanke på eventuelle effekter av utslipp fra havbruksnæringen på skadelige algeoppblomstringer og effekter av skadelige alger på oppdrettsfisk (og andre oppdrettsarter). Det er behov for forskning på årsakene til og hyppigheten av skadelige algeoppblomstringer. Det er også behov for forskning på effekten av mulige mottiltak og undersøkelser av hvilke typer beredskap som er nødvendige for å oppnå en ønsket grad av sikring mot konsekvensene av algeoppblomstringer⁷. Det er også nødvendig å øke kunnskapen om betydningen av andre “problematiske” organismer i en klimasammenheng. Slike problemorganismer kan være begroingsorganismer som frigjøres ved notvask (Bloecher et al., 2015), maneter og høye konsentrasjoner av larver og andre planktoniske stadier av ulike organismer som forekommer naturlig i det marine økosystemet.

Mye av kunnskapen vi har om næringsbehov, opptak og vekst hos planktonalger er fra laboratoriestudier under stabile og kontrollerte betingelser. Dyrking av mikroalger i avløpsvann fra landbasert fiskeproduksjon kan være en kilde til kunnskap om algevekst i næringsrikt medium (Han et al., 2019). Men faktorer som er med på å styre prosessene i sjøen eller de høyst variable omgivelsene er som oftest ikke tatt med. Økt temperatur kan gi økt næringsopptak og vekst i kulturforsøk, men om man begrenser lyset for å simulere formørkning i vannet så motvirkes kanskje effekten. Modellstudier som verktøy for biomasseproduksjon kan tilpasses for å gjenskape omskiftelige miljøer med for eksempel fluktuasjoner i lys og temperatur (Huesemann et al., 2016), men også her er situasjonen statisk og forenklet i forhold til hvordan det vil være ute i sjøen. Mye av kunnskapen vi har er dessuten motivert ut fra ønsker om å produsere mest mulig biomasse av én art for produksjon av biodrivstoff, levendefôr og lignende. Slike situasjoner er svært forskjellige fra situasjoner i naturen, der total biomasse vil være lavere og mange arter vil være til stede og konkurrere om ressurser og kommunisere til hverandre gjennom kjemiske forbindelser. For eksempel kan giftigheten av alger endre seg med miljøbetingelsene (Marchetti et al., 2004; Blossom et al., 2019). Det er derfor ikke mulig å overføre resultater direkte fra laboratorieforsøk til naturlige forhold, og målrettet forskning i felt må gjennomføres.

Utslipp og utnyttelse av utslipp

Det er behov for forskning på hvordan utslippene fra norsk havbruk vil endre seg med klimaet, samtidig som de endrer seg som følge av forvaltning, produksjonsvolum, førsammensetning og andre forhold. Hvor store utslippene er og når og hvor de forekommer er alt sammen av betydning. Utslippene må sees i sammenheng med nye arter i produksjon og ny produksjonsteknologi.

Samtidige effekter og flere stressorer

Et siste, svært omfattende tema, er hvordan klimaendringer virker sammen med andre stressfaktorer på betingelsene for og utslipp fra norsk havbruk. Eksempler på andre stressfaktorer kan omfatte forurensning, miljøgifter, mikroplast og så videre. Mulighetene for utnyttelse av utslippene må også sees i denne sammenhengen.

Referanser

Impacts of climate change on fisheries and aquaculture. FAO fisheries and aquaculture technical paper 627, Food and Agricultural Organization of the UN, 2018.

⁷<https://www.sintef.no/prosjekter/kystnar-beredskap/>

- D. L. Aksnes, N. Dupont, A. Staby, Ø. Fiksen, S. Kaartvedt, and J. Aure. Coastal water darkening and implications for mesopelagic regime shifts in Norwegian fjords. *Mar. Ecol. Prog.*, 397:39–49, 2009.
- M. A. A. Bandpei, H. N. Saravi, R. Rahmati, N. Khodoparast, and A. Keihansani. Examining the effects of fish cage culture on phytoplankton and zooplankton communities in the Southern coast of the Caspian Sea (Mazandaran waters-Kelarabad). *Am. J. Life Sci. Res.*, 4:104–117, 2016.
- E. C. R. Bartozek, N. C. Bueno, and L. C. Rodrigues. Influence of fish farming in net cages on phytoplankton structure: a case study in a subtropical Brazilian reservoir. *Braz. J. Biol.*, 74:145–155, 2014.
- M. Bergvik, L. Stensås, A. Handå, K. I. Reitan, Ø. Strand, and Y. Olsen. Incorporation of feed and fecal waste from salmon aquaculture in great scallops (*Pecten maximus*) co-fed by different algal concentrations. *Frontiers in Marine Science*, 5:524, 2019. ISSN 2296-7745. doi: 10.3389/fmars.2018.00524. URL <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmars.2018.00524>.
- M.-A. Blanchet, R. Primicerio, A. Smalås, J. Arias-Hansen, and M. Aschan. How vulnerable is the european seafood production to climate warming? *Fisheries Research*, 209:251 – 258, 2019. ISSN 0165-7836. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2018.09.004>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016578361830239X>.
- N. Bloecher, O. Floerl, and L. M. Sunde. Amplified recruitment pressure of biofouling organisms in commercial salmon farms: potential causes and implications for farm management. *Biofouling*, 31:163–172, 2015.
- H. E. Blossom, B. Markussen, N. Daugbjerg, B. Krock, A. Norlin, and P. J. Hansen. The cost of toxicity in microalgae: Direct evidence from the dinoflagellate *Alexandrium*. *Frontiers in Microbiology*, 10:1065, 2019. ISSN 1664-302X. doi: 10.3389/fmicb.2019.01065. URL <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmicb.2019.01065>.
- K. Y. Børsheim and L. Golmen. Forsuring av havet. Kunnskapsstatus for norske farvann. Technical report, Havforskningsinstituttet, 2009. 96 s. TA nr 2575/2009. Skrevet for SFT (kontraktsnummer 5009146).
- O. J. Broch, I. Ellingsen, S. Forbord, X. Wang, Z. Volent, M. O. Alver, A. Handå, K. Andresen, D. Slagstad, K. Reitan, Y. Olsen, and J. Skjermo. Modelling the cultivation and bioremediation potential of the kelp *Saccharina latissima* in close proximity to and exposed salmon farm in Norway. *Aquacult. Environ. Interact.*, 4:187–206, 2013.
- O. J. Broch, R. L. Daae, I. H. Ellingsen, R. Nepstad, E. Å. Bendiksen, J. L. Reed, and G. Senneset. Spatiotemporal Dispersal and Deposition of Fish Farm Wastes: A Model Study from Central Norway. *Front. Mar. Sci.*, 4:199, 2017.
- O. J. Broch, M. O. Alver, T. Bekkby, H. Gundersen, S. Forbord, A. Handå, J. Skjermo, and K. Hancke. The kelp cultivation potential in coastal and offshore regions of Norway. *Frontiers in Marine Science*, 5:529, 2019. ISSN 2296-7745. doi: 10.3389/fmars.2018.00529. URL <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmars.2018.00529>.
- T. Chopin, J. A. Cooper, G. Reid, S. Cross, and C. Moore. Open-water integrated multi-trophic aquaculture: environmental biomitigation and economic diversification of fed aquaculture by extractive aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, 4(4):209–220, 2012. doi: 10.1111/j.1753-5131.2012.01074.x. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1753-5131.2012.01074.x>.
- S. Connell, Z. Doubleday, N. Foster, S. Hamlyn, C. Harley, B. Helmuth, B. Kelaher, I. Nagelkerken, K. Rodgers, G. Sarà, and B. Russell. The duality of ocean acidification as a resource and a stressor. *Ecology*, 99:1005–1010, 2018.

- E. Dahl, E. Bagøien, B. Edvardsen, and N. C. Stenseth. The dynamics of *Chrysochromulina* species in the Skagerrak in relation to environmental conditions. *Journal of Sea Research*, 54(1):15 – 24, 2005. ISSN 1385-1101. doi: <https://doi.org/10.1016/j.seares.2005.02.004>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385110105000079>. Contrasting Approaches to Understanding Eutrophication Effects on Phytoplankton.
- A. Dai, D. Luo, and M. Song. Arctic amplification is caused by sea-ice loss under increasing CO₂. *Nat. Commun.*, 10:121, 2019.
- K. Davidson, R. J. Gowen, P. J. Harrison, L. E. Fleming, P. Hoagland, and G. Moschonas. Anthropogenic nutrients and harmful algae in coastal waters. *Journal of Environmental Management*, 146:206 – 216, 2014. ISSN 0301-4797. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.002>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030147971400334X>.
- A. Deininger and H. Frigstad. Reevaluating the role of organic matter sources for coastal eutrophication, oligotrophication, and ecosystem health. *Frontiers in Marine Science*, 6:210, 2019. ISSN 2296-7745. doi: 10.3389/fmars.2019.00210. URL <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmars.2019.00210>.
- C. M. Duarte, J. Wu, X. Xiao, A. Bruhn, and D. Krause-Jensen. Can Seaweed Farming Play a Role in Climate Change Mitigation and Adaption? *Front. Mar. Sci.*, 4(100), 2017. doi:10.3389/fmars.2017.00100.
- I. Ellingsen, D. Slagstad, and A. Sundfjord. Modification of water masses in the Barents Sea and its coupling to ice dynamics: a model study. *Ocean Dyn.*, 59:1095–1108, 2009.
- I. H. Ellingsen, P. Dalpadado, D. Slagstad, and H. Loeng. Impact of climatic change on the biological production in the Barents Sea. *Clim. Change*, 87:155–175, 2008.
- R. P. Ellis, M. A. Urbina, and R. W. Wilson. Lessons from two high co₂ worlds – future oceans and intensive aquaculture. *Global Change Biology*, 23(6):2141–2148, 2017. doi: 10.1111/gcb.13515. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/gcb.13515>.
- H. Endo, Y. Sato, K. Kaneko, D. Takahashi, K. Nagasawa, Y. Okumur, and Y. Agatsuma. Ocean warming combined with nutrient enrichment increases the risk of herbivory during cultivation of the marine macroalga *Undaria Pinnatifida*. *ICES J. Mar. Sci.*, (fsaa069), 2020.
- L. Falconer, S. Hjøllø, T. C. Telfer, B. J. McAdam, Ø. Hermansen, and E. Ytteborg. The importance of calibrating climate change projections to local conditions at aquaculture sites. *Aquaculture*, 514:734487, 2020.
- P. A. Fernández, P. P. Leal, and L. A. Henríquez. Co-culture in marine farms: macroalgae can act as chemical refuge for shell-forming molluscs under an ocean acidification scenario. *Phycologia*, 58(5):542–551, 2019. doi: 10.1080/00318884.2019.1628576. URL <https://doi.org/10.1080/00318884.2019.1628576>.
- F. L. Figueroa, A. Israel, A. Neori, B. Martinez, E. J. Malta, P. A. Jr., S. Inken, R. Marquardt, and N. Korbee. Effects of nutrient supply on photosynthesis and pigmentation in *Ulva lactuca* (chlorophyta): responses to short-term stress. *Aquat. Biol.*, 7:173–183, 2009.
- K. Filbee-Dexter, M. Pedersen, S. Fredriksen, K. Norderhaug, E. Rinde, K. T., J. Albretsen, and T. Wernberg. Carbon export is facilitated by sea urchins transforming kelp detritus. *Oecologia*, 192:213–225, 2020.
- D. M. Fisk, M. D. Powell, and B. F. Nowak. The effect of amoebic gill disease and hypoxia on survival and metabolic rate of Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Bull. Eur. Ass. Fish. Pathol.*, 22:190–194, 2002.
- J. Fossberg, S. Forbord, O. J. Broch, A. M. Malzahn, H. Jansen, A. Handå, H. Førde, M. Bergvik, A. L. Fleddum, J. Skjermo, and Y. Olsen. The potential for upscaling kelp (*Saccharina latissima*) cultivation in

- Salmon-driven integrated multi-trophic aquaculture (imta). *Frontiers in Marine Science*, 5:418, 2018. ISSN 2296-7745. doi: 10.3389/fmars.2018.00418. URL <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmars.2018.00418>.
- H. Frigstad, Ø. Kaste, A. Deininger, K. Kvalsund, G. Christensen, R. G. J. Bellerby, K. Sørensen, M. Norli, and A. L. King. Influence of riverine input on Norwegian coastal systems. In *Frontiers in Marine Science*, 2020.
- K. Gao, J. Beardall, D.-P. Häder, J. M. Hall-Spencer, G. Gao, and D. A. Hutchins. Effects of ocean acidification on marine photosynthetic organisms under the concurrent influences of warming, uv radiation, and deoxygenation. *Frontiers in Marine Science*, 6:322, 2019. ISSN 2296-7745. doi: 10.3389/fmars.2019.00322. URL <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmars.2019.00322>.
- F. Ghaderiardakani, G. Califano, J. F. Mohr, M. H. Abreau, J. C. Coates, and T. Wichard. Analysis of algal growth- morphogenesis-promoting factors in an integrated multi-trophic aquaculture system for farming *Ulva* spp. *Aquacult Environ Interact*, 11:375–391, 2019.
- C. J. Gobler, O. M. Doherty, T. K. Hattenrath-Lehmann, A. W. Griffith, Y. Kang, and R. W. Litaker. Ocean warming since 1982 has expanded the niche of toxic algal blooms in the North Atlantic and North Pacific oceans. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(19):4975–4980, 2017. ISSN 0027-8424. doi: 10.1073/pnas.1619575114. URL <https://www.pnas.org/content/114/19/4975>.
- P. Han, Q. Lu, L. Fan, and W. Zhou. A review on the use of microalgae for sustainable aquaculture. *Appl. Sci*, 9:2377, 2019.
- A. Handå, S. Forbord, X. Wang, O. J. Broch, S. W. Dahle, T. S. Størseth, K. I. Reitan, Y. Olsen, and J. Skjermo. Seasonal- and depth-dependent growth of cultivated kelp (*Saccharina latissima*) in close proximity to salmon (*Salmo salar*) aquaculture in Norway. *Aquaculture*, 414-415:191–201, 2013.
- A. Handå, H. Min, X. Wang, O. J. Broch, K. I. Reitan, H. Reinertsen, and Y. Olsen. Incorporation of fish feed and growth of blue mussels (*Mytilus edulis*) in close proximity to salmon (*Salmo salar*) aquaculture: Implications for integrated multi-trophic aquaculture in Norwegian coastal waters. *Aquaculture*, 356-357: 328 – 341, 2012. ISSN 0044-8486. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.04.048>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0044848612002876>.
- M. Hawrot-Paw, A. Koniuszy, M. Gałczyńska, G. Zając, and J. Szyszlak-Bargłowicz. Production of microalgal biomass using aquaculture wastewater as growth medium. *Water*, 12(1), 2020. ISSN 2073-4441. doi: 10.3390/w12010106. URL <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/1/106>.
- T. Honkanen and H. Helminen. Impacts of fish farming on eutrophication: comparisons among different characteristics of ecosystems. *Int. Rev. Hydrobiol.*, 85:673–686, 2000.
- M. Huesemann, B. Crowe, P. Waller, A. Chavis, S. Hobbs, S. Edmundson, and M. Wigmosta. A validated model to predict microalgae growth in outdoor pond cultures subjected to fluctuating light intensities and water temperatures. *Algal Research*, 13:195 – 206, 2016. ISSN 2211-9264. doi: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.11.008>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211926415300989>.
- M. Hvas, O. Folkedal, A. Imsland, and F. Oppedal. The effect of thermal acclimation on aerobic scope and critical swimming speed in Atlantic salmon, *Salmo salar*. *Journal of Experimental Biology*, 220(15):2757–2764, 2017. ISSN 0022-0949. doi: 10.1242/jeb.154021. URL <https://jeb.biologists.org/content/220/15/2757>.
- IPCC. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. In press, 2019. H.-O. Pörtner and D. C. Roberts and V. Masson-Delmotte and P. Zhai and M. Tignor and E. Poloczanska and K. Mintenbeck and A. Alegría and M. Nicolai and A. Okem and J. Petzold and B. Rama and N. M. Weyer (eds.).

- H. K. Jansen, P. K. Hansen, N. Brennan, T. G. Dahlgren, J., M. A. J. Nederlof, T. Strohmeier, H. Sveier, and Ø. Strand. Enhancing opportunistic polychaete communities under fish farms: an alternative concept for integrated aquaculture. *Aquacult. Environ. Interact.*, 11:331–336, 2019.
- H. M. Jansen, O. J. Broch, R. Bannister, P. C. and. A. Handå, V. Husa, Z. Jiang, T. Strohmeier, and Ø. Strand. Spatio-temporal dynamics in the dissolved nutrient waste plume from Norwegian salmon cage aquaculture. *Aquacult. Environ. Interact.*, pages 385–399, 2018.
- Z. Jiang, Y. Liao, J. Liu, L. Shou, Q. Chen, X. Yan, G. Zhu, and J. Zeng. Effects of fish farming on phytoplankton community under the thermal stress caused by a power plant in a eutrophic, semi-enclosed bay: Induce toxic dinoflagellate (*Prorocentrum minimum*) blooms in cold seasons. *Marine Pollution Bulletin*, 76(1): 315 – 324, 2013. ISSN 0025-326X. doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.07.006>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X13003755>.
- T. Johannesen and E. Dahl. Declines in oxygen concentrations along the Norwegian Skagerrak coast, 1927-1993: A signal of ecosystem changes due to eutrophication? *Limnol. Oceanogr.*, 41:766–778, 1996.
- L. Käse and J. K. Geuer. Phytoplankton responses to marine climate change – an introduction. In S. Jungblut, V. Liebich, and M. Bode, editors, *YOUMARES 8 – Oceans Across Boundaries: Learning from each other*, pages 55–71, Cham, 2018. Springer International Publishing. ISBN 978-3-319-93284-2.
- R. E. Keeling, K. Arne, and N. Gruber. Ocean deoxygenation in a warming world. *Ann. Rev. Mar. Sci.*, 2: 199–229, 2010.
- A. Kullgren, F. Jutfelt, R. Fontanillas, K. Sundell, L. Samuelsson, K. Wiklander, P. Kling, W. Koppe, D. J. Larsson, B. T. Björnsson, and E. Jönsson. The impact of temperature on the metabolome and endocrine metabolic signals in Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 164(1):44 – 53, 2013. ISSN 1095-6433. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2012.10.005>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1095643312004837>.
- D. Kyriliuk and S. Kratzer. Summer distribution of total suspended matter across the Baltic Sea. *Frontiers in Marine Science*, 5:504, 2019. ISSN 2296-7745. doi: [10.3389/fmars.2018.00504](https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00504). URL <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmars.2018.00504>.
- D. Laffoley and J. M. Baxter, editors. *Ocean deoxygenation: Everyone's problem - Causes, impacts, consequences and solutions*. IUCN, 2019. Switzerland, 580pp.
- H. Madsen, D. Lawrence, M. Lang, M. Martinkova, and T. Kjeldsen. Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe. *Journal of Hydrology*, 519:3634 – 3650, 2014. ISSN 0022-1694. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.003>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169414008889>.
- A. Marchetti, V. L. Trainer, and P. J. Harrison. Environmental conditions and phytoplankton dynamics associated with *Pseudo-nitzschia* abundance and domoic acid in the Juan de Fuca eddy. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 281:1–12, 2004.
- M. Masó and E. Garcés. Harmful microalgae blooms (hab); problematic and conditions that induce them. *Marine Pollution Bulletin*, 53(10):620 – 630, 2006. ISSN 0025-326X. doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2006.08.006>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X06002992>. The Oceans and Human Health.
- M. McGovern, A. Evenset, K. Borgå, H. A. de Wit, H. F. V. Braaten, D. O. Hessen, S. Schultze, A. Ruus, and A. Poste. Implications of coastal darkening for contaminant transport, bioavailability, and trophic transfer in northern coastal waters. *Environmental Science & Technology*, 53(13):7180–7182, 2019. doi: [10.1021/acs.est.9b03093](https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03093). URL <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03093>. PMID: 31190537.

- M. Meinshausen, S. J. Smith, K. Calvin, J. S. Daniel, M. L. T. Kainuma, J.-F. Lamarque, K. Matsumoto, S. A. Montzka, S. C. B. Raper, K. Riahi, A. Thomson, G. J. M. Velders, and D. P. van Vuuren. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change*, 109:213–241, 2011.
- M. Meredith, M. Sommerkorn, S. Cassotta, C. Derksen, A. Ekaykin, A. Hollowed, G. Kofinas, A. Mackintosh, J. Melbourne-Thomas, M. Muelbert, G. Ottersen, H. Pritchard, , and E. Schuur. Polar regions. In H.-O. Pörtner, D. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, and N. Weyer, editors, *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. IPCC, 2019. In press.
- S. Moore, V. L. Trainer, N. J. Mantua, M. S. Parker, E. A. Laws, L. C. Backer, and L. E. Fleming. Impacts of climate variability and future climate change on harmful algal blooms and human health. *Environ. Health*, 7:S4, 2008.
- K. A. Mork, Ø. Skagseth, and H. Sjøiland. Recent warming and freshening of the Norwegian Sea observed by Aargo data. *J. Climate*, 32:3695–3705, 2019.
- N. Navarro, R. J. G. Leakey, and K. D. Black. Effect of salmon cage aquaculture on the pelagic environment of temperate coastal waters: seasonal changes in nutrients and microbial community. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 361:47–58, 2008.
- N. Neofitou and S. Klaoudatos. Effect of fish farming on the water column nutrient concentration in a semi-enclosed gulf of the eastern mediterranean. *Aquaculture Research*, 39(5):482–490, 2008. doi: 10.1111/j.1365-2109.2008.01900.x. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2109.2008.01900.x>.
- A. Neori, T. Chopin, M. Troell, A. H. Buschmann, G. P. Kraemer, C. Halling, M. Shpigel, and C. Yarish. Integrated aquaculture: rationale, evolution and state of the art emphasizing seaweed biofiltration in modern mariculture. *Aquaculture*, 231:361–391, 2004.
- A. Neori, L. Guttman, A. Israel, and M. Shpigel. Israeli-Developed Models of Marine Integrated Multi-Trophic Aquaculture (IMTA). *Journal of Coastal Research*, 86:11–20, 2019.
- Y. Olsen, H. Reinertsen, U. Sommer, and O. Vadstein. Responses of biological and chemical components in north east atlantic coastal water to experimental nitrogen and phosphorus addition – a full scale ecosystem study and its relevance for management. *Science of The Total Environment*, 473-474:262 – 274, 2014. ISSN 0048-9697. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.12.028>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969713014824>.
- P. Pitta, M. Tsapakis, E. T. Apostolako, T. Tsagaraki, M. Holmer, and I. Karakassis. 'ghost nutrients' from fish farms are transferred up the food web by phytoplankton grazers. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 374:1–6, 2009.
- G. D. Pruder. Aquaculture and controlled eutrophication: Photoautotrophic/heterotrophic interaction and water quality. *Aquacultural Engineering*, 5(2):115 – 121, 1986. ISSN 0144-8609. doi: [https://doi.org/10.1016/0144-8609\(86\)90010-5](https://doi.org/10.1016/0144-8609(86)90010-5). URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0144860986900105>. Aquacultural Engineering and Simulation.
- G. K. Reid, H. J. Gurney-Smith, M. Flaherty, A. F. Garber, I. Forster, K. Brewer-Dalton, D. Knowler, D. J. Marcogliese, T. Chopin, R. D. Moccia, C. T. Smith, and S. D. Silva. Climate change and aquaculture: considering adaption potential. *Aquacult. Environ. Interact*, 11:603–624, 2019a.
- G. K. Reid, H. J. Gurney-Smith, D. J. Marcogliese, D. Knowler, T. Benfey, A. F. Garber, I. Forster, T. Chopin, K. Brewer-Dalton, R. D. Moccia, , M. Flaherty, C. T. Smith, and S. D. Silva. Climate change and aquaculture: considering biological respons and resources. *Aquacult. Environ. Interact*, 11:569–602, 2019b.

- M. Remen, F. Solstorm, S. Bui, P. Klebert, T. Vågseth, D. Solstorm, M. Hvas, and F. Oppdeal. Critical swimming speed in groups of Atlantic salmon *Salmo salar*. *Aquacult. Environ. Interact.*, 8:659–664, 2016.
- G. Sarà, M. Lo Martire, M. Sanfilippo, G. Pulicanò, G. Cortese, A. Mazzola, A. Manganaro, and A. Pusceddu. Impacts of marine aquaculture at large spatial scales: Evidences from N and P catchment loading and phytoplankton biomass. *Marine Environmental Research*, 71(5):317 – 324, 2011. ISSN 0141-1136. doi: <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2011.02.007>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141113611000341>.
- G. Sarà, E. M. Porporato, M. C. Mangano, and N. Mieszkowska. Multiple stressors facilitate the spread of a non-indigenous bivalve in the Mediterranean Sea. *Journal of Biogeography*, 45(5):1090–1103, 2018. doi: 10.1111/jbi.13184. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jbi.13184>.
- L. E. Schmidt and P. J. Hansen. Allelopathy in the prymnesiophyte *Chrysochromulina polylepsis*: effect of cell concentration, growth phase and pH. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 216:67–81, 2001.
- S. Schmidtko, L. Stramma, and M. Visbeck. Decline in global oceanic oxygen content during the past five decades. *Nature*, 542:335–339, 2017.
- M. Seidelin, C. J. Brauner, F. B. Jensen, and S. S. Madsen. Vacuolar-Type H-ATPase and Na, K-ATPase expression in gills of Atlantic salmon (*Salmo salar*) during isolated and combined exposure to hyperoxia and hypercapnia in fresh water. *Zological Science*, 18:1199–1205, 2001.
- S. Skejic, I. Marasovic, O. Vidjak, G. Kuspilic, Z. Nincevic Gladan, S. Sestanovic, and N. Bojanic. Effects of cage fish farming on phytoplankton community structure, biomass and primary production in an aquaculture area in the middle Adriatic Sea. *Aquaculture Research*, 42(9):1393–1405, 2011. doi: 10.1111/j.1365-2109.2010.02733.x. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2109.2010.02733.x>.
- D. Slagstad and T. A. McClimans. Modelling the ecosystem dynamics of the Barents sea including the marginal ice zone: I. Physical and chemical oceanography. *J. Mar. Sys.*, 58:1–18, 2005.
- D. Slagstad, I. Ellingsen, and P. Wassmann. Evaluating primary and secondary production in an Arctic Ocean void of summer sea ice: An experimental simulation approach. *Progress in Oceanography*, 90(1):117 – 131, 2011. ISSN 0079-6611. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2011.02.009>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079661111000243>. Arctic Marine Ecosystems in an Era of Rapid Climate Change.
- A. Stien, P. A. Bjørn, P. A. Heuch, and D. A. Elston. Population dynamics of salmon lice *Lepeophtheirus salmonis* on Atlantic salmon and sea trout. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 290:263–275, 2005.
- M. Tossavainen, K. Lahti, M. Edelmann, R. Eskola, A.-M. Lampi, V. Piironen, P. Korvonen, A. Ojala, and M. Romantschuk. Integrated utilization of microalgae cultured in aquaculture wastewater: wastewater treatment and production of valuable fatty acids and tocopherols. *J. Appl. Phycol.*, 31:1753–1763, 2019.
- T. M. Tsagaraki, P. Pitta, C. Frangoulis, G. Petihakis, and I. Karakassis. Plankton response to nutrient enrichment is maximized at intermediate distances from fish farms. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 493:31–42, 2013.
- E. Tynan, J. S. Clarke, M. P. Humphreys, M. Ribas-Ribas, M. Esposito, V. M. Rérolle, C. Schlosser, S. E. Thorpe, T. Tyrrell, and E. P. Achterberg. Physical and biogeochemical controls on the variability in surface pH and calcium carbonate saturation states in the Atlantic sectors of the Arctic and Southern Oceans. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 127:7 – 27, 2016. ISSN 0967-0645. doi: <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2016.01.001>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967064516000126>. Impacts of surface ocean acidification in polar seas and globally: a field-based approach.

- K. W. Vollset, R. J. Lennox, J. G. Davidsen, S. H. Eldøy, T. E. Isaksen, A. Madhun, S. Karlsson, and K. M. Miller. Wild salmonids are running the gauntlet of pathogens and climate as fish farms expand northwards. *ICES J. Mar. Sci.*, (fsaa138), 2020.
- X. Wang, L. M. Olsen, K. I. Reitan, and Y. Olsen. Emission of nutrient wastes from norwegian salmon aquaculture: nutrient loading of receiving waters and potential for integrated multi-trophic aquaculture. *Aquacult. Environ. Interact.*, 2:267–283, 2012.
- Z. Wang, J. Zhao, Y. Zhang, and Y. Cao. Phytoplankton community structure and environmental parameters in aquaculture areas of Daya Bay, South China Sea. *Journal of Environmental Sciences*, 21(9):1268 – 1275, 2009. ISSN 1001-0742. doi: [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)62414-6](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)62414-6). URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1001074208624146>.
- P. Wassmann, D. Slagstad, and I. Ellingsen. Advection of mesozooplankton into the Northern Svalbard shelf region. *Frontiers in Marine Science*, 6:458, 2019. ISSN 2296-7745. doi: 10.3389/fmars.2019.00458. URL <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmars.2019.00458>.
- M. L. Wells, B. Karlson, A. Wulff, R. Kudela, C. Trick, V. Asnagli, E. Berdalet, W. Cochlan, K. Davidson, M. De Rijcke, S. Dutkiewicz, G. Hallegraeff, K. J. Flynn, C. Legrand, H. Paerl, J. Silke, S. Suikkanen, P. Thompson, and V. L. Trainer. Future HAB science: Directions and challenges in a changing climate. *Harmful Algae*, 91:101632, 2020. ISSN 1568-9883. doi: <https://doi.org/10.1016/j.hal.2019.101632>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S156898831930099X>. Climate change and harmful algal blooms.
- U. Winther, E. S. Hognes, S. Jafarzade, and F. Ziegler. Greenhouse gas emissions of Norwegian seafood products in 2017. Technical Report 2019:01505, SINTEF Ocean, 2020.
- S. Woodcock, T. Strohmeier, Ø. Strand, S. Olsen, and R. Bannister. Mobile epibenthic fauna consume organic waste from coastal fin-fish aquaculture. *Marine Environmental Research*, 137:16 – 23, 2018. ISSN 0141-1136. doi: <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2018.02.017>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141113617307432>.
- J. Zhang, J. Fang, W. Wang, M. Du, Y. Gao, and M. Zhang. Growth and loss of mariculture kelp *Saccharina japonica* in Sungo Bay, China. *J. Appl. Phycol.*, 24:1209–1216, 2012.



Teknologi for et bedre samfunn
www.sintef.no