

8040-2025

Vurdering av oksygentrender i norske farvann



Rapport

Løpenummer: 8040-2025

ISBN 978-82-577-7777-7
NIVA-rapport
ISSN 1894-7948

Denne rapporten er
kvalitetssikret iht. NIVAs
kvalitetssystem og
godkjent av:

André Staalstrøm
Prosjektleder

Elianne Dunthorn Egge
Kvalitetssikrer

Ailbhe Lisette Macken
Forskningsleder

© Norsk institutt for
vannforskning og
Miljødirektoratet.
Publikasjonen kan siteres
fritt med kildeangivelse.

www.niva.no

Norsk institutt for vannforskning

Tittel norsk/engelsk

Vurdering av oksygentrender i norske
farvann
Assessment of oxygen trends in
Norwegian waters

Sider

47

Dato

06.01.2025

Forfatter(e)

André Staalstrøm, Evgeniy Yakushev,
Anfisa Berezina, Shamil Iakubov,
Lars Golmen

Fagområde

Klima

Distribusjon

Åpen

Oppdragsgiver(e)

Miljødirektoratet

Kontaktperson hos oppdragsgiver

Ingrid Handå Bysveen

Utgitt av NIVA

Prosjektnummer 240209

Oppdragsgivers utgivelse:

M-2905 | 2025

Sammendrag

Data fra norske fjorder sør for Trondheim viser at oksygenkonsentrasjoner har sunket mange steder. I indre deler av Storfjorden innenfor Ålesund har oksygenkonsentrasjonene sunket med 0.5-1.0 ml/L i perioden 1991-2023. Den samme nedgangen finner en på 1000 m dyp i Sognefjorden i perioden 1970-2020. I mange andre terskelfjorder på Vestlandet er det også rapportert om nedgang i oksygenkonsentrasjonen. I de åpne vannmassene utenfor norskekysten fant vi ingen signifikante endringer i oksygenkonsentrasjonen, men datagrunnlaget her er begrenset. Nedgang i oksygenkonsentrasjon kan skyldes økt temperatur, økt tilførsel av organisk stoff og næringssalter, eller en kombinasjon av disse. Både i åpne og kystnære vannmasser langs norskekysten har det vært en tydelig oppvarming av vannet, og vann på 150 m dyp blitt 0.6-0.7 grader varmere de siste 35-40 år. Dette samsvarer med globale trender i havtemperatur. For å kvantifisere effekten av tilførsler vs. temperaturstigning ble Sognefjorden brukt som eksempel. Tilførsel til Sognefjorden innenfor terskelen ved Losna har økt med en faktor 1.5 for nitrogen og 3.4 for fosfor. Ved modellering av oksygenforholdene i Sognefjorden kan omtrent to tredeler av nedgangen i oksygenkonsentrasjon tilskrives økt tilførsel og den siste tredjedelen økt havtemperatur. Den økningen i havtemperatur som vi ser langs hele norskekysten og som også sammenfaller med globale trender, gjør at fjordene tåler mindre tilførsel av næringssalter og organisk stoff.

Emneord: Oseanografi, Oksygen, Eutrofiering, Klima

Keywords: Oceanography, Oxygen, Eutrophication, Climate

Innholdsfortegnelse

Forord	4
Sammendrag	5
Summary	6
1 Innledning	7
1.1 Bakgrunn for prosjektet	7
1.2 Hvorfor er det viktig å ha gode oksygenforhold?	8
1.3 Dypvannsfornyelse og oksygenforhold i terskelfjorder	10
1.4 Datagrunnlaget	12
2 Et varmere hav	14
3 Oksygentrender	16
3.1 Forhold i Barentshavet	18
3.2 Forhold i Trondheimsfjorden	19
3.3 Storfjorden på Sunnmøre	20
3.4 Forhold i Byfjorden utenfor Bergen	25
3.5 Forhold i Sognefjorden	27
3.6 Forhold i Skagerrak	30
3.7 Forhold i Indre Oslofjord	31
4 Modellering av Sognefjorden	33
4.1 Oppsett av NIVA Fjordmodell	33
4.2 Resultater fra NIVA Fjordmodell	35
4.3 Oppsett av 3D havmodell (Oceananigans-OxyDep)	37
5 Diskusjon og konklusjon	39
5.1 Utveksling mellom atmosfæren og havets vannmasser	39
5.2 Dobbelt påvirkning – klima og tilførsel	41
5.3 Oppsummering av resultatene	42
6 Referanser	44

Forord

Jeg har hørt mye om sommeren 1975. Min mor var høygravid med meg og var på bilferie på Vestlandet, så jeg har blitt fortalt det var varmt. Temperaturmålinger fra Aurlandsfjorden gjenspeiler dette og det varmeste vannet på 30 m dyp finner man sensommeren 1975. Det var også varmere det året enn det som er registrert i perioden 2019-2023. Til tross for dette så er middeltemperaturen på 30 m hele 1.4°C varmere nå enn på 70-tallet (10.3°C mot 8.9°C).

Denne utviklingen er urovekkende, og i dette prosjektet har NIVA på oppdrag fra Miljødirektoratet fått i oppgave å svare på om klimaendringer har ført til endring i oksygenforhold i norske farvann. Oksygenforholdene påvirkes også av tilførsel av næringssalter, og som en del av prosjektet har vi sett på hvordan påvirkningsfaktorene klima og tilførsel kan endre oksygenforholdene, med fokus på Sognefjorden.

Kontaktperson ved Miljødirektoratet har vært Ingrid Handå Bysveen. I prosjektarbeidet har André Staalstrøm, Evgeniy Yakushev og Lars Golmen jobbet med trendanalyse og forfattet rapporten. I tillegg til Staalstrøm og Yakushev har også Anfisa Berezina og Shamil Iakubov jobbet med modellering av oksygenforhold. Golmen har vært hovedforfatter for kapittel 3.3 og dette er skrevet på nynorsk.

André Staalstrøm, Oslo, 30.12.2024

Sammendrag

Data fra norske fjorder sør for Trondheim viser at oksygenkonsentrasjoner har sunket mange steder. I indre deler av Storfjorden innenfor Ålesund har oksygenkonsentrasjonene sunket med 0.5-1.0 ml/L i perioden 1991-2023. Den samme nedgangen finner en på 1000 m dyp i Sognefjorden i perioden 1970-2020. I mange andre terskelfjorder på Vestlandet er det også rapportert om nedgang i oksygenkonsentrasjonen. I de åpne vannmassene utenfor norskekysten fant vi ingen signifikante endringer i oksygenkonsentrasjonen, men datagrunnlaget her er begrenset. Nedgang i oksygenkonsentrasjon kan skyldes økt temperatur, økt tilførsel av organisk stoff og næringssalter, eller en kombinasjon av disse. Både i åpne og kystnære vannmasser langs norskekysten har det vært en tydelig oppvarming av vannet, og vann på 150 m dyp blitt 0.6-0.7 grader varmere de siste 35-40 år. Dette samsvarer med globale trender i havtemperatur. For å kvantifisere effekten av tilførsler vs. temperaturstigning ble Sognefjorden brukt som eksempel. Tilførsel til Sognefjorden innenfor terskelen ved Losna har økt med en faktor 1.5 for nitrogen og 3.4 for fosfor. Ved modellering av oksygenforholdene i Sognefjorden kan omtrent to tredeler av nedgangen i oksygenkonsentrasjon tilskrives økt tilførsel og den siste tredjedelen økt havtemperatur. Den økningen i havtemperatur som vi ser langs hele norskekysten og som også sammenfaller med globale trender, gjør at fjordene tåler mindre tilførsel av næringssalter og organisk stoff.

Summary

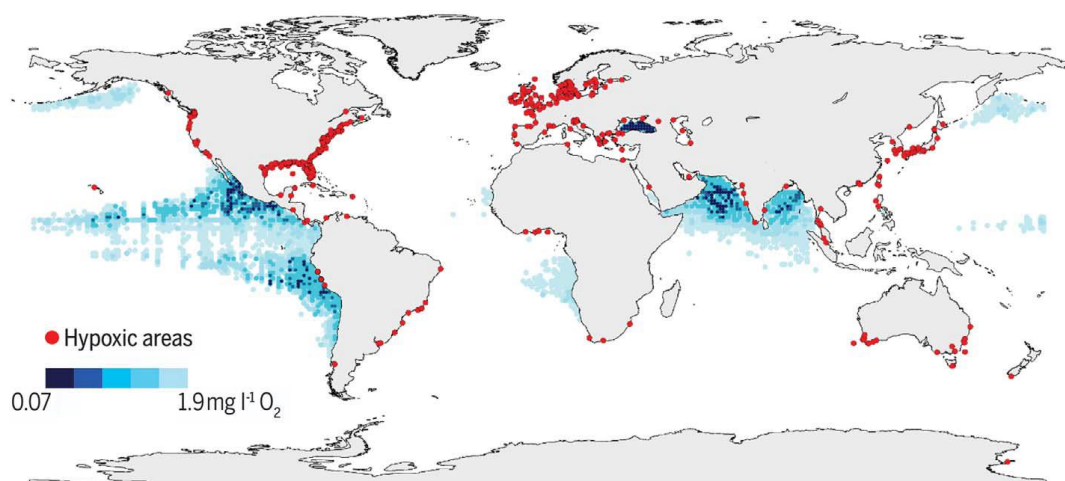
Data from Norwegian fjords south of Trondheim shows that oxygen concentrations have decreased in many places. In the inner parts of Storfjorden within Ålesund, oxygen concentrations have decreased by 0.5-1.0 ml/L in the period 1991-2023. The same decline can be found at a depth of 1,000 metres in the Sognefjord between 1970 and 2020. Decreases in oxygen concentrations have also been reported in many other threshold fjords in Western Norway. In the open water masses off the Norwegian coast, we found no significant changes in oxygen concentration, but the data basis here is limited. Decreases in oxygen concentration may be due to increased temperature, increased input of organic matter and nutrient salts, or a combination of these. In both open and coastal water masses along the Norwegian coast, there has been a clear warming of the water, and water at a depth of 150 metres has become 0.6-0.7 degrees warmer over the past 35-40 years. This is consistent with global trends in ocean temperature. To quantify the effect of inputs vs. temperature rise, the Sognefjord was used as an example. Inputs to the Sognefjord within the Losna threshold have increased by a factor of 1.5 for nitrogen and 3.4 for phosphorus. When modelling the oxygen conditions in the Sognefjord, approximately two thirds of the decrease in oxygen concentration can be attributed to increased input and the last third to increased sea temperature. The increase in sea temperature that we see along the entire Norwegian coast, which also coincides with global trends, means that the fjords are more vulnerable for discharge of nutrients and organic matter.

1 Innledning

1.1 Bakgrunn for prosjektet

Globalt sett så har oksygeninnholdet i havet sunket de siste 50 årene, og dette har blitt knyttet til økt global temperatur og tilførsel av næringssalter (Breitburg et al., 2018, se Figur 1). Breitburg et al. (2018) baserer seg blant annet på at etter 1950 har mer enn 500 lokaliteter rundt omkring på kloden rapportert om oksygenkonsentrasjoner lavere 2 mg/L^1 , som ofte brukes som en definisjon på oksygenfattige (**hypokiske**) vannmasser. Kun en tiendedel av disse lokalitetene hadde rapportert om oksygenfattige vannmasser før 1950. Galli et al. (2024) gjorde en modell-studie av oksygenforholdene i Nordsjøen, og fant negative trender for oksygenkonsentrasjon nær bunn på opp mot -1 mg/L på det meste på 80 år, men at det var store geografiske forskjeller. Den største nedgangen fant de i Norskerenna. De fant at klimaeffekter med et varmere hav, forklarte en uniform nedgang på i oksygen på ca. -0.3 mg/L over hele området, mens biologiske prosesser kunne forklare den geografiske variabiliteten.

I dette prosjektet skal vi undersøke om den samme trenden finnes i data fra norske farvann. Det neste spørsmålet vi skal se på er om eventuelle trender kan knyttes til klimaendringer. Dette innebærer at vi først vil se hvordan havtemperaturen har endret seg i norske farvann. Det tredje spørsmålet vi skal se på er om eventuelle trender kan knyttes til tilførsel av næringssalter og organisk stoff. For det siste spørsmålet er det valgt å fokusere på området rundt Sognefjorden.



Figur 1: Lavt og synkende oksygenivå i åpent hav og kystvann påvirker alt fra biogeokjemi prosesser til matsikkerhet. Det globale kartet viser kystområder oksygenkonsentrasjonen er redusert til lavere enn 2 mg/L . Dette tilsvarer det som ville blitt klassifisert som svært dårlige forhold i henhold til Tabell 1 ($<1.5 \text{ mL/L}$). De røde prikkene markerer områder hvor det er hypoksiske forhold, mens fargesskalen viser minimumssoner i 300 m dyp (blå skyggelagte områder). [Kart laget av data levert av R. Diaz, oppdatert av medlemmer av GO2NE-nettverket, og lastet ned fra World Ocean Atlas 2009].

I flere hundre millioner år har oksygenkonsentrasjonen i atmosfæren vært stabilt høy. Allikevel har oksygenkonsentrasjonen i havet ikke vært langt unna oksygenfattige forhold, og basert på studier av geologien så har det vært perioder hvor svært store områder har vært helt oksygenfattige (Watson, 2016).

¹ I denne rapporten bruker vi faktoren 0.7 for å beregne oksygenkonsentrasjon i mL/L fra mg/L . Dvs. at 2 mg/L tilsvarer 1.4 mL/L . Vi har likevel benyttet verdien 1.5 mL/L til å definere grensa mellom hypoksisk og oksisk vann i denne rapporten, siden dette er en tallverdi som også benyttes i Veileder 02:2018.

Disse globale oksygenfattige episodene kan knyttes til økning i karbondioksid i atmosfæren (Percival et al., 2016), og det er derfor svært alarmerende at vi nå ser økning i CO₂ i atmosfæren samtidig som oksygenkonsentrasjonen i havet reduseres.

1.2 Hvorfor er det viktig å ha gode oksygenforhold?

Alle høyere former for marine organismer har et minstekrav til vannets oksygenkonsentrasjon for å kunne trives. Ved for lav konsentrasjon flykter de mobile artene (som for eksempel fisk) fra området. For eksempel er forekomsten av reker i Indre Oslofjord begrenset til områder hvor oksygenkonsentrasjonen er over 1 ml/L. Torsken har større krav enn rekene (2-3 ml/L, Plante et al., 1998). Hvis alt oksygenet forsvinner, dannes hydrogensulfid som er en dødelig forbindelse for de fleste marine arter. Fastsittende organismer dør, og fisken flykter i beste fall. Oksygen er derfor en viktig forklaringsvariabel for økologisk tilstand; målinger av oksygen i dypvannet over tid gir informasjon om oksygenforbruk, vannutskifting og belastning fra organisk stoff og ammonium. Det er ingen miljøvariabel, med en så omfattende økologisk påvirkning, som har endret seg så dramatisk over kort tid, som oksygen (Diaz & Rosenberg 1995).

Oksygen i vannmassene forbrukes ved nedbrytning av organisk stoff, ved bakteriell nitrifikasjon av ammonium og ved organismers respirasjon. Tilførsel av oksygen skjer bare i kontakt med luft og ved fotosyntese til planteplankton og makroalger i øvre vannlag. I fjordbassenger hvor utskiftning av dypvann er forhindret av terskler, vil oksygenet i vannmassene derfor brukes gradvis opp.

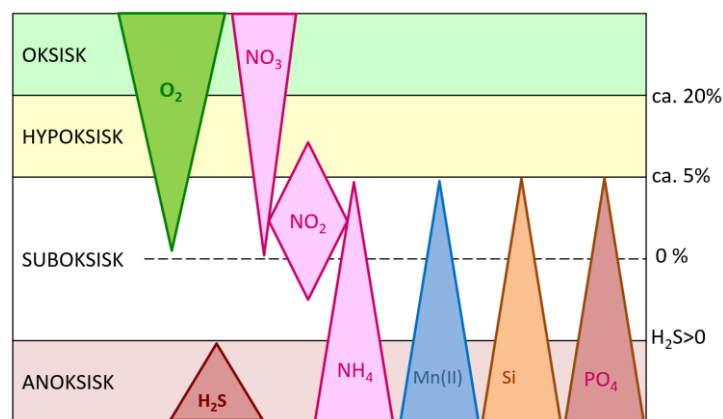
Vann med høyere oksygenmetning enn ca. 20 % defineres som oksygenholdig eller **oksisk**. Kirkerud (1998) gjorde en grundig gjennomgang av hvilke oksygenivåer som gir økosystemeffekter. Om oksygenmetningen er under 65% (ca. 4.5 ml/L) så bør dette vekke bekymring. I intervallet 50-65% (ca. 3.5-4.5 ml/L) vil det kunne være små effekter, som f.eks. redusert respirasjon. I intervallet 35-50% (ca. 2.5-3.5 ml/L) vil det være mer alvorlige konsekvenser, som redusert vekst for fisk, men det vil ikke være dødelig. I intervallet 20-35% (ca. 1.5-2.5 ml/L) vil det kunne forekomme fiskedød, samt negative effekter på hyperfauna, som er dyr som lever over bunnen (f.eks. reker) og epifauna som er dyr som er knyttet til stein eller andre faste gjenstander i sjøen. Eksperimenter som Plante et al. (1998) utførte på atlantisk torsk, viste at oksygenivåer ned mot 35% (over fire dager) ikke gir dødelighet. I intervallet 20-35% vil det være dødelighet for torsk. Ved oksygenmetning på 21% dør halvparten av torsken. Fra Indre Oslofjord finner man en klar sammenheng mellom forekomst av reker og oksygenforhold i intervallet 20-35%. Når oksygenmetningen er 15-20 % (rundt 1,0-1,5 ml/L) er det svært lav reketetthet, men er oksygenmetningen 35 % (ca. 2,5 ml/L) er reketettheten høy (Berge & Amundsen, 2016). Dette innebærer at selv en forbedring fra "svært dårlig" (< 1.5ml/L) til "dårlig" (1.5-2.5ml/L) tilstand vil gi bedre forhold for reker (se Tabell 1).

Tabell 1: Grenseverdier for oksygenklasser fra Klassifiseringsveileder for kyst- og ferskvann. I høyre kolonne er oksygenforholdene beskrevet. Disse klassegrensene gjelder for laveste verdi i bunnvannet.

Tilstands-klasse	Dagens grenseverdier i Veileder 02:2018 Enhet: ml/L (%)	Oksygen-tilstand
Svært god	> 4,5 (>65)	Oksisk
God	3,5 – 4,5 (50-65)	Oksisk
Moderat	2,5 – 3,5 (35-50)	Oksisk
Dårlig	1,5 – 2,5 (20-35)	Oksisk
Svært dårlig	< 1,5 (<20)	Hypoksisk

Yakushev & Newton (2013) gir en grunnleggende innføring i de kjemiske forholdene i oksygenfattige (hypoksiske) og oksygenfrie (sub- og anoksiske) forhold. Dette er skjematisk fremstilt i Figur 3. Vann med lavere oksygenmetning enn ca. 20 % defineres som oksygenfattig (hypoksiske). Kirkerud (1998) fremhever denne grensen og sier at dette oksygennivået har alvorlige økologiske konsekvenser, som betyr at det vil være dødelighet i epifaunaen og det vil forekomme fiskedød i vannmassene.

Vann med lavere oksygenmetning enn ~5% (ca. 0,3 mL/L) defineres som **suboksiske**. Det er da så lite oksygen at bakterier starter å denitrifisere nitrat, og det vil forekomme økte konsentrasjoner av nitritt og også ammonium. Andre kjemiske forbindelser, som f.eks. mangan, reduseres også. Det vil også være lite primærproduksjon som forbruker næringsstoffer, og disse vil da hope seg opp siden det er en stadig tilførsel fra høyere opp i vannmassene. Under suboksiske forhold vil det typisk være svært høye konsentrasjoner av fosfat (PO_4), silikat (SiO_2) og ammonium. Ammonium hopper seg opp fordi nitrifikasjonsbakteriene får ugunstige betingelser. Når oksygenfrie vannmasser (suboksiske eller anoksiske) løftes opp i terskelfjorder, i forbindelse med dypvannsfornyelser, vil det derfor gi en brå tilførsel av næringssalter til grunnere områder, og i tillegg kan fiskedød forekomme grunnet rask nedgang i oksygentilgang. Av disse grunner er det viktig at dypvannet i en vannforekomst holder seg over 5 % oksygenmetning (ca. 0,3 mL/L).



Figur 2: Skjematisk fremstilling av lave oksygenforhold og forekomst av noen kjemiske forbindelser som er avhengig av oksygenforholdene. Figuren er bearbeidet fra figur hentet fra Yakushev & Newton (2013).

De kjemiske forholdene endrer seg radikalt når alt oksygen forsvinner. I anoksiske vannmasser er det svært lite som lever, og det er derfor heller ingen organismer som bruker opp næringssaltene. Næringssalter som synker ned sammen med organiske partikler hopper seg derfor opp med tiden. Nitrat og nitritt reduseres (denitrifiseres) og det dannes nitrogengass (N_2), mens det vil være igjen store mengder nitrogen i form av ammonium (pga. fullstendig fravær av nitrifikasjon), fosfat og silikat som stammer fra nedsynkende organisk stoff. Under anoksiske forhold vil også fosfor bundet i sedimentene lekke ut til bunnvannet. I vannmasser som over tid er helt oksygenfrie vil det, etter at forskjellige kjemiske forbindelser er redusert, dannes hydrogensulfid. Hydrogensulfid oppstår raskere om det er store mengder organisk stoff til stede. Vann hvor hydrogensulfid forekommer defineres som **anoksiske**.

I Norge klassifiseres oksygenforholdene etter Klassifiseringsveileder for kyst- og ferskvann² som er veilederen til Vannforskriften. Klassegrensene er gjengitt i Tabell 1. I det norske systemet er klassegrensene relativt strenge og det fokuseres ikke på suboksiske (<5%) eller anoksiske forhold (forekomst av hydrogensulfid). En vannforekomst blir klassifisert som svært dårlig når den laveste verdien

² Tidligere betegnet som Veileder 02:2018

i det dypeste punktet er under 1,5 ml O₂/L. Det oppnås ikke god økologisk tilstand om de laveste oksygenforholdene i dypvannet kommer under 3,5 ml O₂/L, og det vil si at det for mange vannforekomster vil være umulig å oppnå god tilstand.

1.3 Dypvannsfornyelse og oksygenforhold i terskelfjorder

I fjorder hvor det er grunne områder i munningen, er vannutvekslingen i dypvannet på innsiden begrenset. Slike fjorder kalles terskelfjorder og det fins mange slike i norske farvann. I kystsonen er som regel vannet sjiktet, med ferskt og lett vann i overflatelaget, som ligger over saltene og tyngre vann. Vannets egenvekt eller tetthet, øker derfor som regel med dypet. Det tunge vannet som befinner seg innenfor terskelen og under terskeldyp er derfor fanget i fjorden, og byttes bare ut når vann som er enda tyngre kommer inn over terskelen. Slike episoder kalles dypvannsfornyelser. I perioden mellom disse episodene ligger dypvannet i ro, bortsett fra en begrenset vertikal blanding som blander ned lettere vann fra overflatelaget. I perioden når vannet er stillestående tilføres ikke bassengvannet oksygen, og det vil med tiden brukes opp. Nytt oksygenrikt vann tilføres under dypvannsfornyelser.

Denne prosessen er illustrert i Figur 3, som viser de forskjellige stadier av vannutvekslingen i en fjord. I stadie 1 ligger forholdene til rette for en dypvannsfornyelse: på sjøsiden er det vann med tilstrekkelig høy egenvekt (rødt) nesten helt opp til terskeldyp, men terskelen hindrer dette vannet fra å trenge inn i fjorden, hvor vannmassene (lys rosa) har lavere egenvekt. Vannet på sjøsiden er oksygenrikt, mens dypvannet innenfor terskelen er hypoksisk (lav oksygenkonsentrasjon).

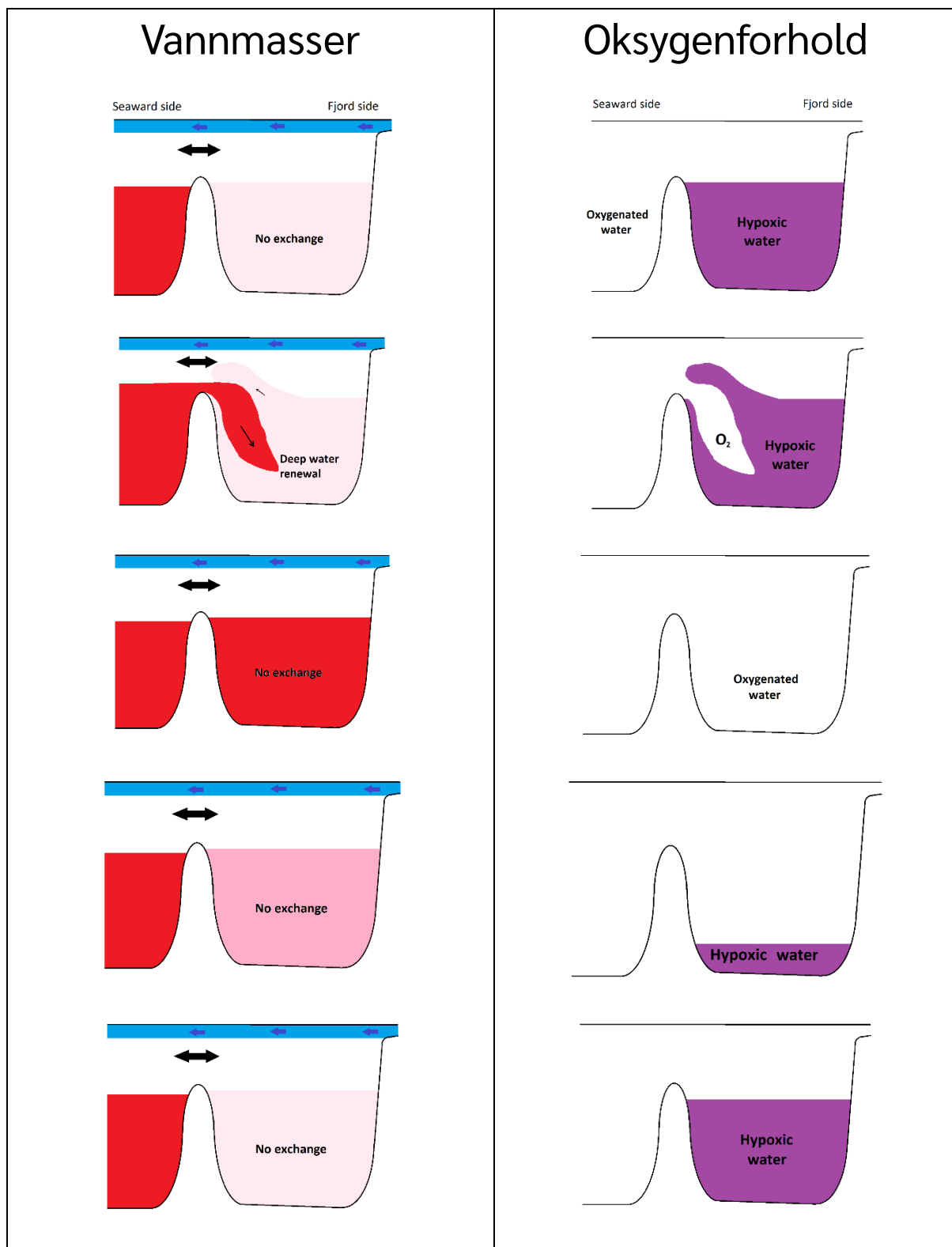
I stadie 2 vises en dypvannsfornyelse. Det tunge oksygenrike vannet fra utsiden av terskelen er hevet over terskeldypet, og fortrenger det oksygenfattige dypvannet. I stadie 3 har alt det oksygenfattige dypvannet blitt fornyet av tungt oksygenrikt vann. På dette stadiet er det ikke noe potensial for ytterligere dypvannsfornyelse, og en stagnasjonsperiode starter. I denne perioden (stadie 4 og 5) er det et kappløp mellom vertikal blanding, som blander ned lettere vann og dermed reduserer tettheten i dypvannet, og oksygenforbruket i fjorden.

For å bedre på oksygenforholdene i bunn kan man endre på forutsetningene i dette kappløpet. Dette har vi mennesker allerede gjort med negativt fortegn, ved at vi har økt tilførslene av stoffer som fører til økt oksygenforbruk. Derfor er det helt nødvendig å redusere tilførslene til fjorden. Men det er også mulig å endre forutsetningen ved å øke den vertikale omrøringen i fjordbassengene, og dermed gjøre oppholdstiden kortere og tilføre mer oksygen til bunnvannet. Forholdene kan også endre seg ved at klimaendringer gjøre vannet på utsiden varmere og dermed lettere. Dette kan føre til at dypvannsfornyelser skjer mer sjelden.

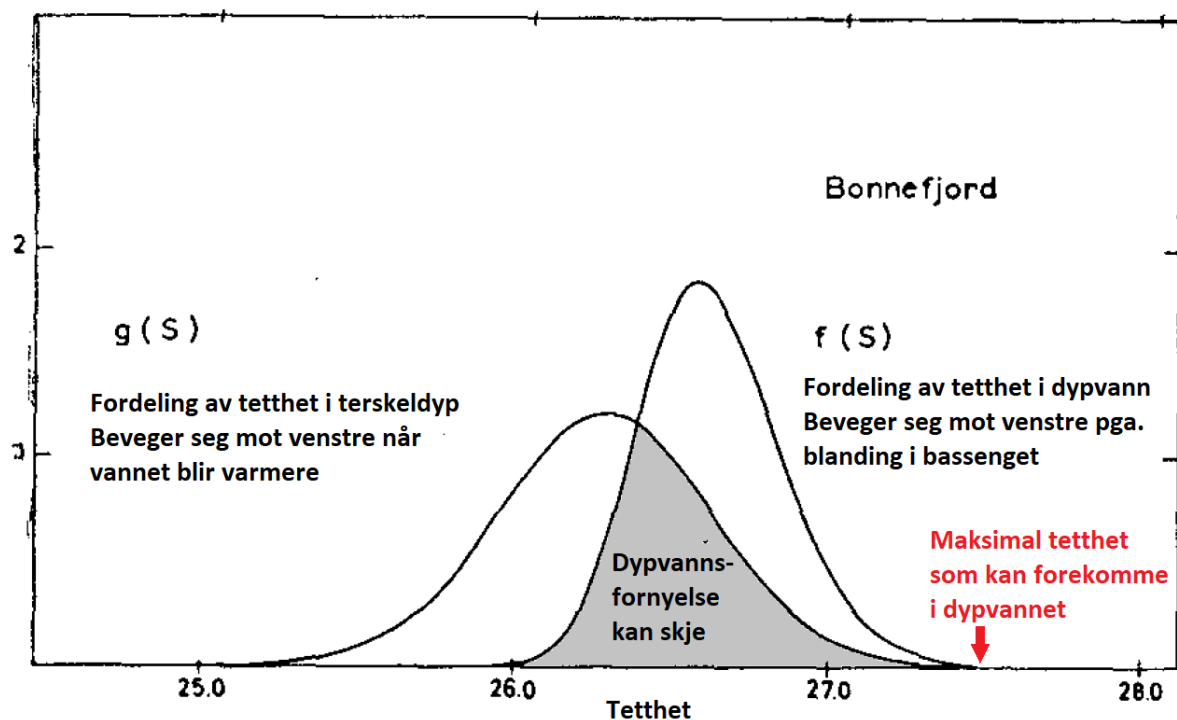
Gade (1973) beskrev dynamikken med dypvannsfornyelser som en stokastisk prosess (se Figur 4), som kunne forklares ved å se på sannsynlighetsfordelingen til vannets tetthet i terskeldyp på utsiden av fjorden ($g(S)$), og egenvekten til tettheten av dypvannet inne i fjorden ($f(S)$). Dypvannsfornyelse kan skje når

$$g(S) > f(S)$$

Dette området er markert med grått i Figur 4. I et varmere klima vil fordelingen av tetthet på utsiden ($g(S)$) bevege seg mot venstre, det vil si mot lavere tetthet. Dette betyr at det grå feltet i figuren blir mindre, og dypvannsfornyelser vil skje sjeldnere. Etter en stund vil også kurven for tettheten i dypet inne i fjorden bevege seg mot venstre, og dette vil motvirke denne effekten. Johnsen et al. (2021) så på endring i frekvensen av dypvannsfornyelser i 74 terskelfjorder langs norskekysten. De sammenlignet perioden 1960-1990 med perioden 1990-2020. De fant at i 23 av de 74 fjordene tydet beregningene på at dypvannsfornyelsene skjer sjeldnere i den seneste perioden.



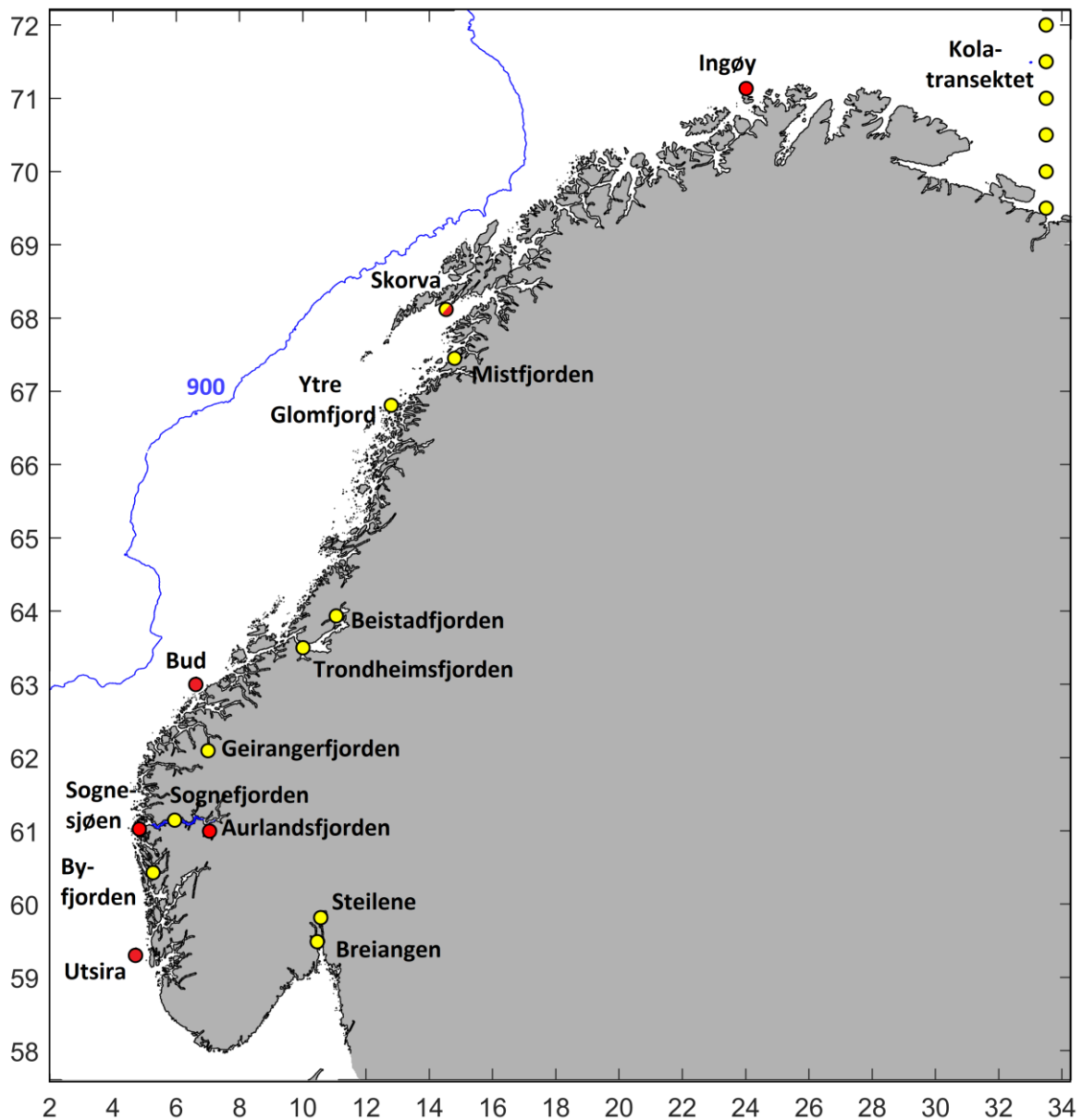
Figur 3: Skisse av hvordan vannutveksling kan foregå i en terskelfjord med lite vertikal blanding av bunnvannet. Det er et kappløp mellom vertikal blanding og oksygenforbruk. På venstre siden vises egenvekten til vannmassene, hvor rødt indikerer tungt vann og rosa lettere vann. På høyre side vises oksygenforholdene i vannmassene, hvor hvitt indikerer oksygenrikt vann og lilla oksygenfattig vann.



Figur 4: Sannsynlighetsfordeling av tetthet i bassenget under terskeldyp $f(S)$ og i terskeldyp på utsiden $g(S)$. Sannsynlighet for at en dypvannsfornyelse kan skje er bestemt av arealet av det grå feltet, hvor tetthet i terskeldyp er høyere enn tetthet i bunnvannet. Figuren er modifisert fra Gade (1973) som brukte data fra Steilene og Bonnefjorden i Indre Oslofjord.

1.4 Datagrunnlaget

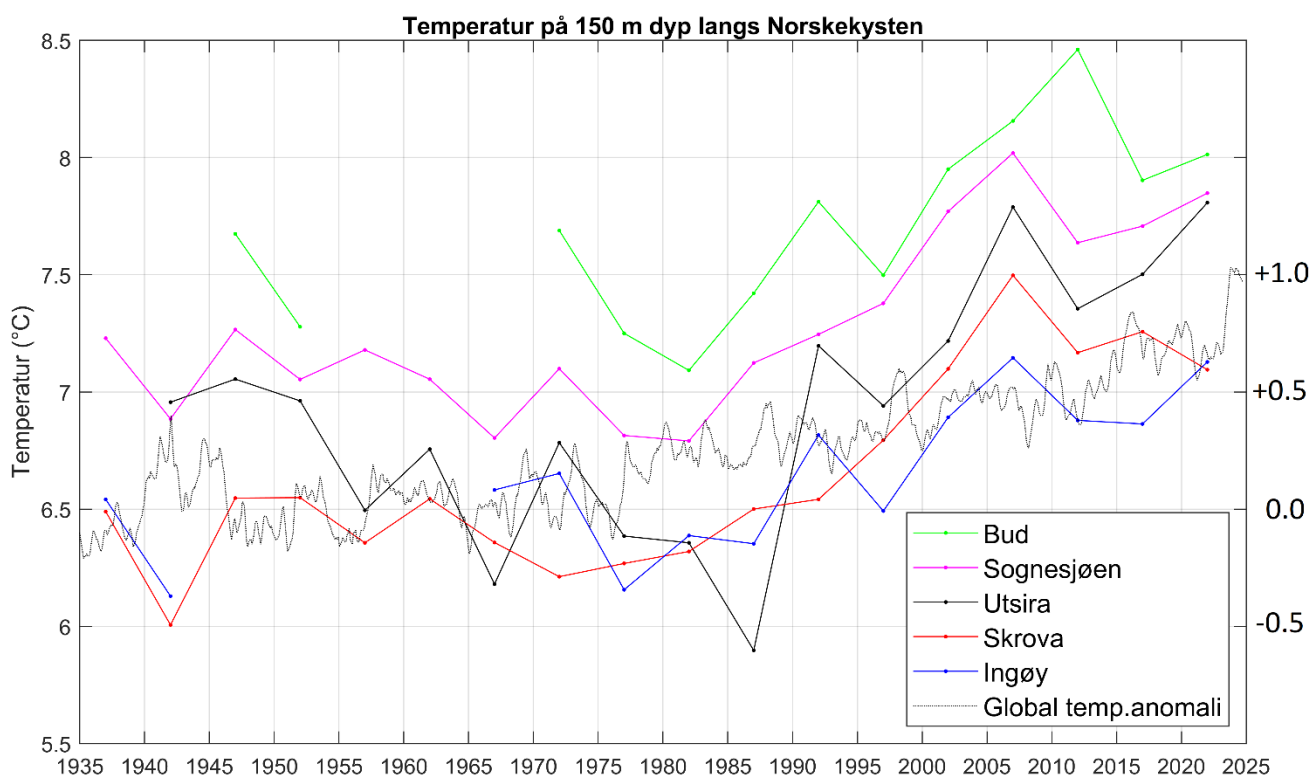
En oversikt over datapunkter som er brukt i denne rapporten er vist i Figur 5. Vi har lastet ned alle målinger av oksygen som fins i Vannmiljø og i NIVA sin database. Flesteparten av dataene er fra nyere tid. Av eldre observasjoner fins det kun data fra et fåtall målepunkter, og nesten ingen nord for Trondheimsfjorden. Det nordligste målepunktet med historiske data i disse to databasene er fra Ytre Glomfjord. For å se på trend i oksygenforholdene i nordområdene har det blitt lastet ned data fra Kolatransektet (Karaskov et al., 2022), hvor det fins data tilbake til før 1940. I tillegg til dette har vi brukt data fra Havforskningsinstituttet (Byfjorden, Sognefjorden), Universitetet i Bergen (Sognefjorden) og fra Nord Universitet (Mistfjorden). Stasjoner som har blitt benyttet for å analysere temperaturutviklingen er markert med røde punkter i Figur 5. De fleste av disse er Havforskningsinstituttets faste stasjoner, og en er fra NVE sin database (Aurlandsfjorden).



Figur 5: Oversiktskart over de viktigste stasjonene. De røde punktene er stasjoner som brukes for å se på trender i temperatur. De gule punktene er stasjoner som brukes for å se på endringer oksygen.

2 Et varmere hav

Langs Norskekysten har vi unike måleserier med observasjoner av temperatur og saltholdighet gjennom hele vannsøylen. Dette er Havforskningsinstituttets faste målestasjoner, som strekker seg fra Lista til Ingøy³. De eldste målingene er fra 1935. Det har blitt tatt målinger typisk en til to ganger i måneden. I Figur 6 har kvartalsmiddel for juli til september blitt midlet over perioder på fem år. I figuren er det valgt ut fem stasjoner fra Utsira i sør til Ingøy i nord, som dekker en kyststrekning på 1580 km (se Figur 5). På alle stasjonene har det blitt 0.6-0.7 grader varmere, og det ser ut til at økningen hovedsakelig har vært de siste 35-40 år. I samme figur er endring i global havtemperatur i overflatelaget tegnet inn⁴, og trendene i temperatur i vannmassen langs Norskekysten sammenfaller med den globale trenden, hvor det også har vært en tilsvarende økning i temperaturen.

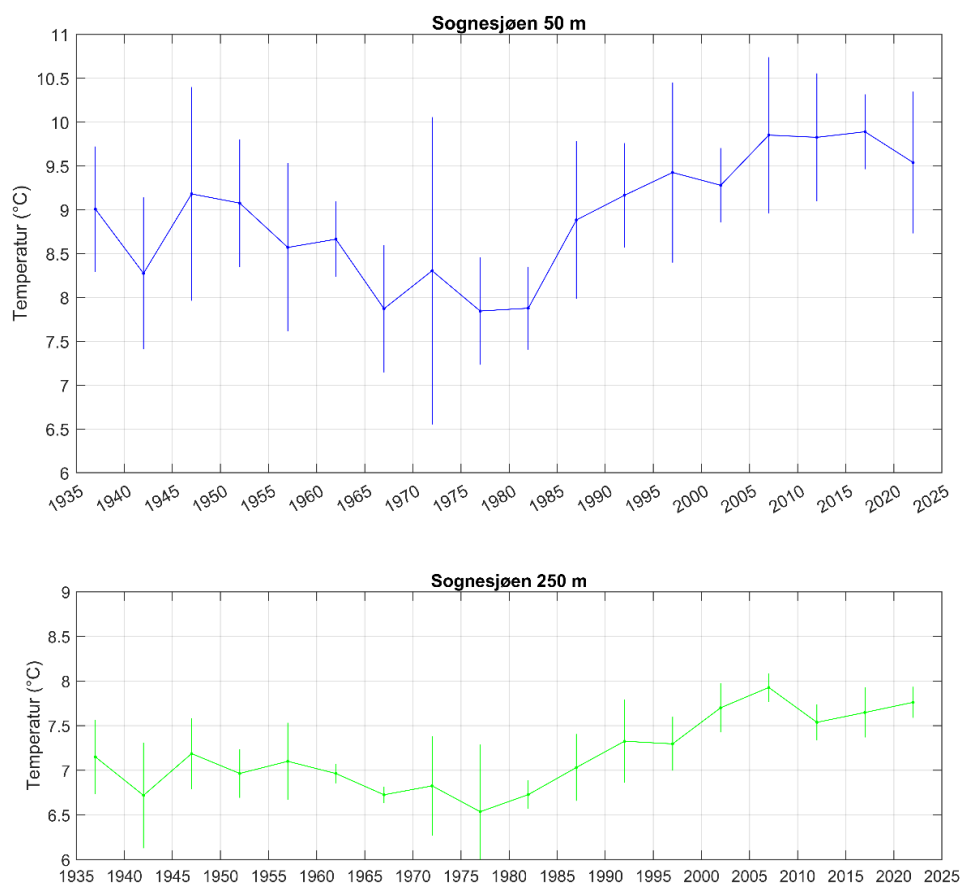


Figur 6: Temperatur langs Norskekysten på 150 m dyp. For Utsira ble stasjonen Indre Utsira benyttet hvor data har blitt samlet kun ned til 125 m, så for den stasjonen har dette dypet blitt brukt. Stiplet kurve viser endring i global havtemperatur, hvor verdiene vises på høyre vertikale akse.

Økningen i temperatur kan observeres i hele vannsøylen. I Figur 7 vises temperaturen på 50 og 250 m dyp ved Sognesjøen. På 250 m dyp er trenden tilsvarende som i 150 m dyp, mens i 50 m dyp ser det ut til at økningen er større enn dypere ned. Dette tyder på at oppvarmingen av havet dekker et svært stort område, og at svært mye varme er lagret i havet i forhold til situasjonen for 30-40 år siden. Økning i temperatur gjør at vannet får lavere egenvekt, og dette kan påvirke sirkulasjonen i terskelfjorder.

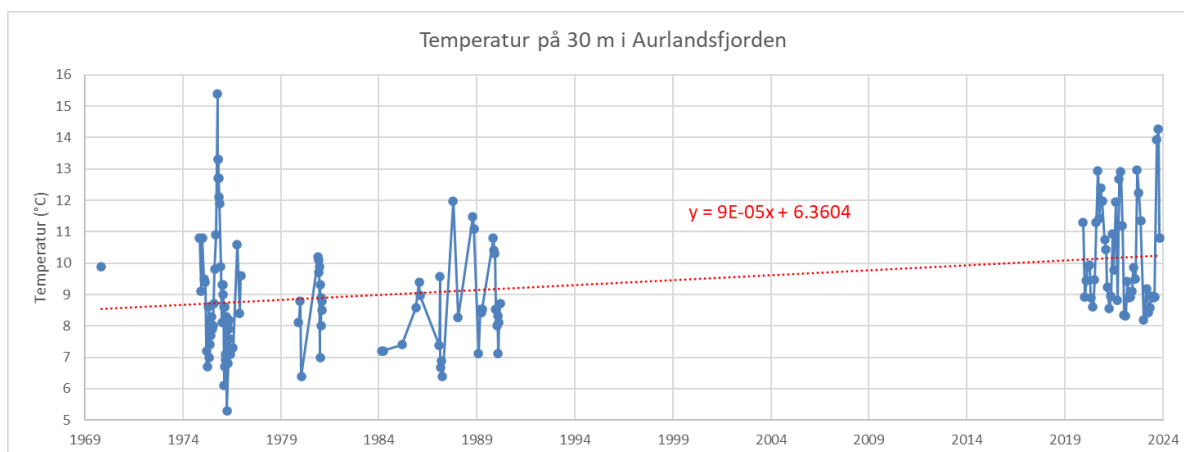
³ Data er hentet fra <https://www.imr.no/forskning/forskningsdata/stasjoner/index.html>

⁴ Data er hentet fra <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/global/time-series/globe/tavg/ocean/3/0/1850-2024>



Figur 7: Vanntemperaturen (juli-september) i to dyp på stasjon Sognesjøen midlet over perioder på 5 år. De vertikale linjene viser middelerdi $\pm$ standardavvik for hver periode.

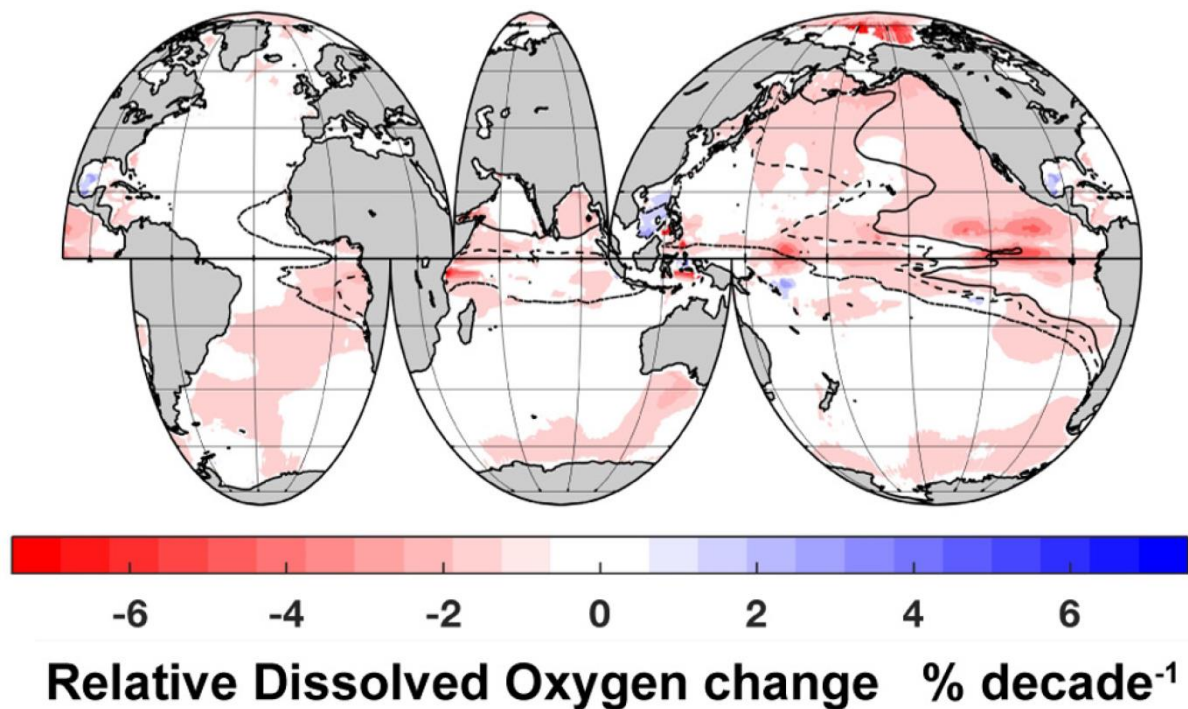
I Figur 8 vises målt temperatur på 30 m dyp i Aurlandsfjorden. Den varmeste temperaturen ble registrert i 1975, men gjennomsnitt fra perioden 2019-2023 var 1.4 °C høyere enn i perioden 1975-1980 (10.3°C mot 8.9°C).



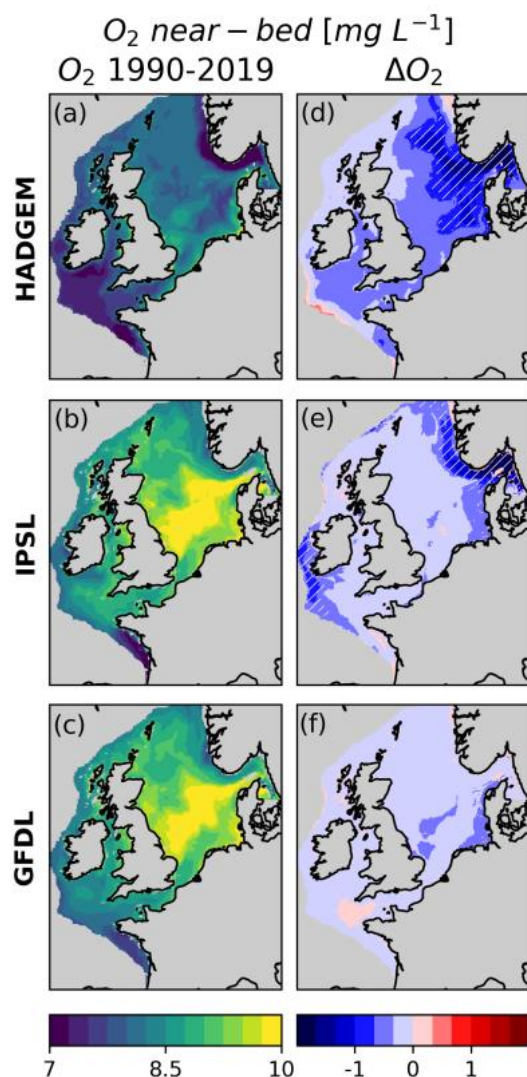
Figur 8: Målt temperatur fra 30 m i Aurlandsfjorden. Data er hentet fra NVE sin målestasjon Nærøynes og fra stasjon VT79 som er på omtrent samme sted (se plassering i Figur 5). Den varmeste registreringen på 30 m er fra 8. oktober 1975, etter den varme sommeren det året.

3 Oksygentrender

Garcia-Soto et al. (2021) gir et overblikk over globale oksygentrender. Det er betydelig nedgang mange steder i verden, spesielt i området rundt ekvator. Men ifølge datasettet benyttet av Garcia-Soto et al. (2021) er det mindre enn en halv prosent endring i havområdet utenfor Norge.



Figur 9: Global trend i oksygenkonsentrasjon i havet hvor enheten er prosentvis endring per tiår i perioden 1960-2010. Figuren er hentet fra Garcia-Soto et al. (2010) som har basert dette på data fra Schmidtke et al. (2017).



Figur 10: Modellert oksygenkonsentrasjon nær bunn i Nordsjøen, med tre forskjellige modeller. Figuren er hentet fra Galli et al. (2024). Til høyre vises endring i oksygen fra perioden 1990-2019 til perioden 2070-2099.

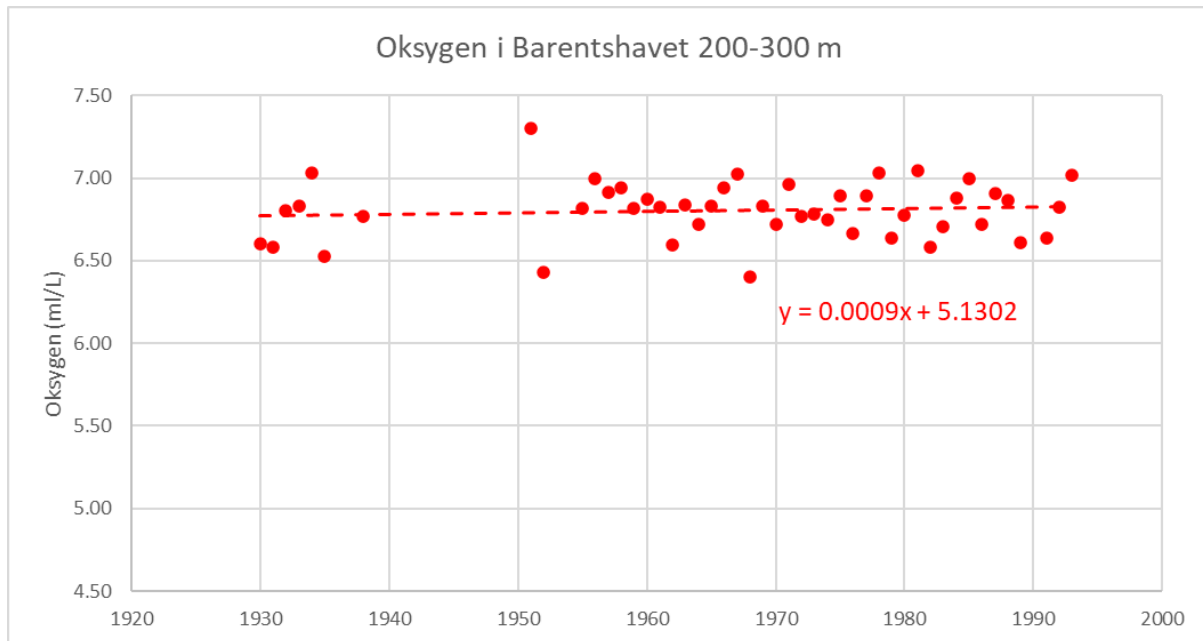
Galli et al. (2024) modellerte oksygenforholdene langs bunn i Nordsjøen (Figur 10), og de fant at oksygenkonsentrasjonen vil gå ned opp til 1 mg/L i Nordsjøen de neste 80 årene. Nedgangen er størst i Norskerenna. I denne rapporten vil vi se nærmere på oksygendata fra norske farvann.

Fra nordlige områder langs norskekysten har det ikke vært lett å finne historiske data. De nordligste dataene fra NIVA sin database er fra området ved Glomfjorden. Der er det tre oksygenprofiler ned til 250 m dyp fra november 1977, 1978 og 1980 på en stasjon ute i kystvannet. Oksygenkonsentrasjonen på 250 m lå da mellom 5.6-5.9 ml/L. Til sammenligning så bruker vi data fra stasjon VT29 ved Skrova, som riktignok ligger 160 km lenger nord, men som også er ute i de åpne vannmassene i kystvannet. Her var oksygenkonsentrasjonene på 250 m i november 2021-2023 på mellom 5.9-6.4 ml/L. Disse observasjonene indikerer at det har vært liten endring, og i hvert fall ingen negativ trend.

I dette kapitlet skal vi se på trender i oksygen i de dataene vi har funnet. Vi starter med å se på forholdene i nord, og så beveger vi oss sørover derfra, til Trondheimsfjorden, til Storfjorden innenfor Ålesund som strekker seg inn mot Geiranger, til Sognefjorden, til Byfjorden utenfor Bergen og til slutt ender vi opp i Oslofjorden.

3.1 Forhold i Barentshavet

I Figur 11 vises oksygen målt på 200-300 m dyp i Barentshavet. Data er fra de seks stasjonene som er vist langs 33.5°E i Figur 5. Disse stasjonene er del av det som kalles Kola-transektet (Karaskov et al., 2020). Fra 1930 til 1993 holder nivået seg på et stabilt nivå. Data er lastet ned fra NOAA⁵ sin database, og her er det også data fra andre deler av Barentshavet som er nyere enn 1993. Disse dataene viser heller ingen nedadgående trend i perioden 1993-2016.



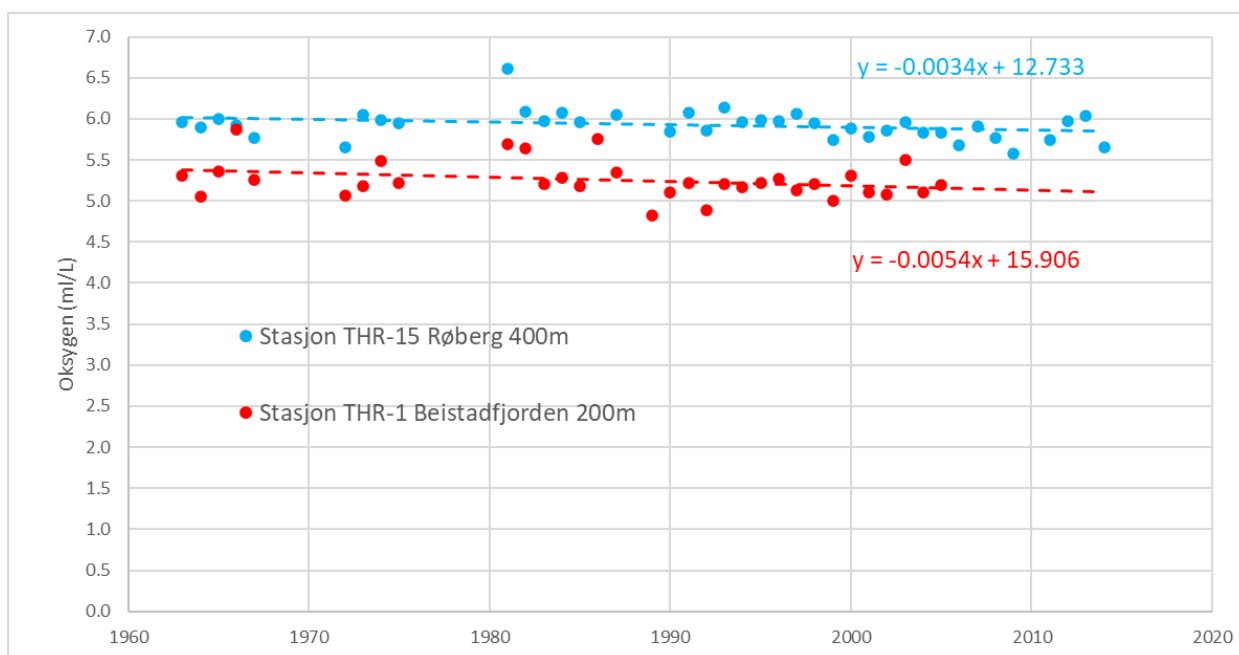
Figur 11: Oksygen målt på 200-300 m dyp i Barentshavet. Data er fra de seks stasjonene som er vist langs 33.5°E i Figur 5. Punktene viser data midlet for hvert år.

⁵ <https://www.ncei.noaa.gov/access/world-ocean-database-select/bin/dbsearch.pl>

3.2 Forhold i Trondheimsfjorden

I Trondheimsfjorden er det en svakt nedadgående trend i oksygen i dypvannet, men denne trenden er ikke signifikant. Data fra Vannmiljø er hentet ut fra 400 m på stasjon THR-15 Røberg sentralt i Trondheimsfjorden og fra 200 m på stasjon THR-1 Beistadfjorden (se Figur 12).

Det er verdt å merke seg at en av de 23 fjordene som Johnsen et al. (2021) fant ville få mer sjeldne dypvannsfornyelser var Verrasundet (63.86°N, 10.81°E), som ligger innenfor Beistadfjorden. Ifølge Lande (1974) ble det målt oksygen her i 1972 og 1973 og at verdien i september var mellom 2 og 4 ml/L, men disse dataene er ikke å finne i Vannmiljø. Verrasundet er en vannforekomst som burde overvåkes for forverring i oksygenforholdene.



Figur 12: Oksygenkonsentrasjon midlet for hvert år det er data. Data fra Røberg sentralt i Trondheimsfjorden er fra 400 m dyp, mens data fra Beistadfjorden er fra 200 m dyp.

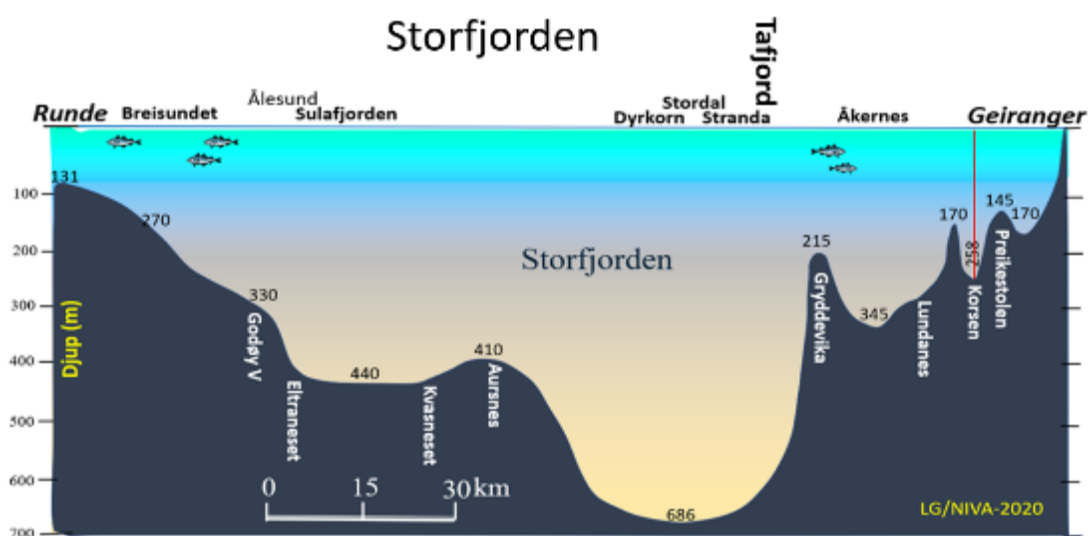
3.3 Storfjorden på Sunnmøre

Storfjorden er ein lang, djup og open fjord, som strekker seg frå Stranda ut til Breisundet ved Ålesund (Figur 13). Fjorden har forgreiningane Hjørundfjorden, Tafjorden, Sunnlyvsfjorden og Geirangerfjorden. Geirangerfjorden og Tafjorden ligg innanfor verdsarvområdet Vestnorsk fjordlandskap og er på verdsarvlista til UNESCO.

Storfjorden har betydeleg trafikk av store turistskip, med destinasjon Geiranger (eller Hjørundfjorden). Sjøfartsdirektoratet har laga forslag til krav om nullutslepp for turistskip og ferjer i desse fjordane frå 2026. Der er fleire større akvakulturanlegg i sjøen og på land i indre del av Storfjorden. Fleire større kraftverk av avlaup til fjorden, noko som truleg har medført endring både i sirkulasjon og sjikting, som observert i andre fjordar (Lie. m. fl. 1992).



Figur 13: Kart over Søre Sunnmøre med Storfjorden og forgreiningane Hjørundfjorden, Tafjorden og Geirangerfjorden. Norddalsfjorden er ytre del av Tafjorden.



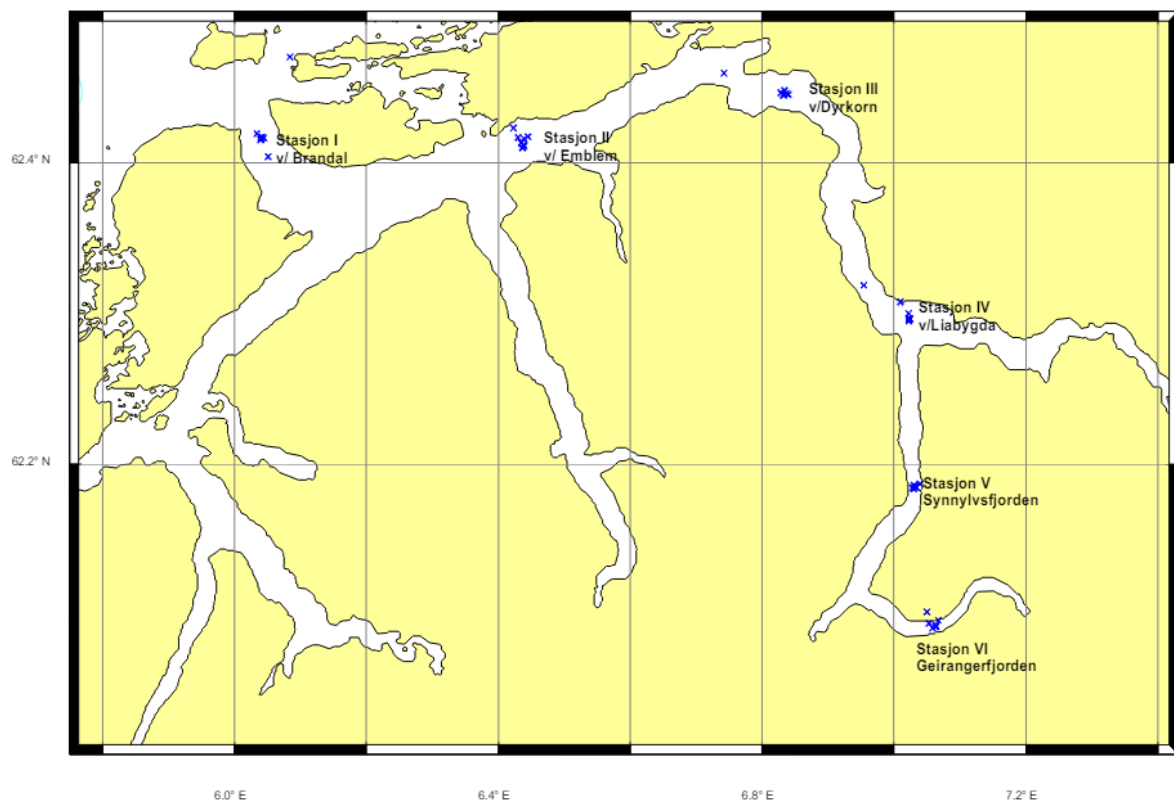
Figur 14: Lengdesnitt av Storfjorden.

Figur 14 syner eit lengdesnitt av fjorden, med djupner. Ved Stranda er det målt 686 m djup. I Sulafjorden er det flat botn og om lag 400 m djupt.

Hydrografi

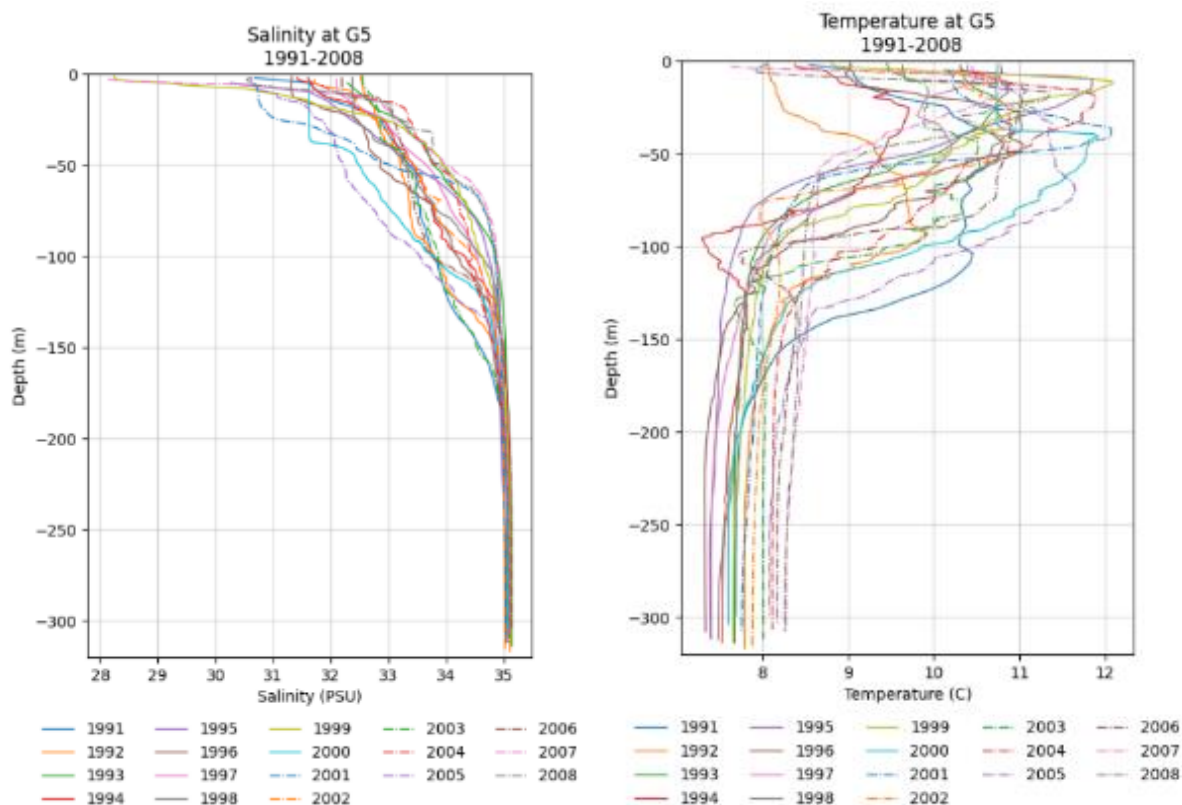
Havforskningsinstituttet hadde ein hydrografisk/kjemisk målekampanje frå 1991-2008 ('Haust-tokta', med første del rapportert av Møreforsking (Dyb m. fl. 2003). Stasjonane er synt i Figur 15). NIVA og Runde miljøsenter gjer månadlege målingar i midtvegs inn i Geirangerfjorden (Korsen), i s.b.m. nasjonal overvaking (Økokyst programmet). Der er det målingar frå 2017 til d.d., sist rapportert av Egge m. fl. (2024).

Ved Korsen vert det i programmet målt temperatur, salinitet og oksygen nedover i sjøen til botnen ved om lag 250 m djup. I tillegg er inkludert kjemiske prøver (næringssalt, klorofyll) og gjort kartlegging av botnfauna og strandsone.



Figur 15: Oversikt over stasjonsnett til Havforskningsinstituttet sitt årlege hausttokt i Storfjorden i perioden 1991-1998 (henta frå Dyb mfl., 2003, Runde miljøsenter 2024). Posisjonen til stasjon VI samsvarar med Økokyst stasjon VR51.

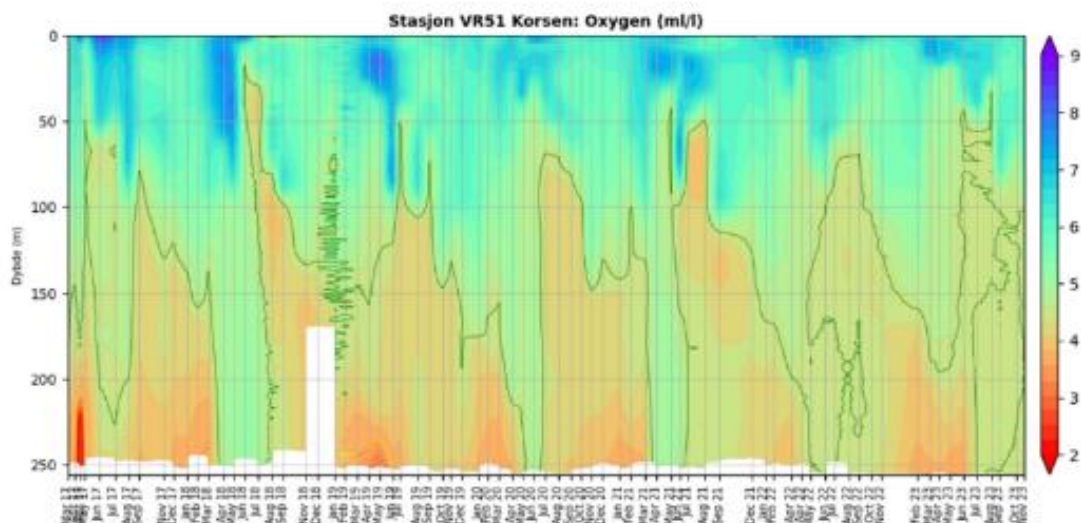
Målingane frå 'Haust-tokta' i munningen av Storfjorden for perioden 1991-2008 er synt i Figur 16. Målingane er frå slutten av den varme årstida, og avkjølinga i øvre lag har gjeve utslag ved eit temperaturmaksimum under overflata, i 10-70 m djup (varierende frå år til år). Under 150 m djup er det lite variasjon i verdiane.



Figur 16: Vertikalprofilar av målt salinitet og temperatur ved stasjon G5 i munningen av Norddalsfjorden/Tafjord, 1991-2008. Data er frå HI ('Haust-tokta'), opparbeidd av NIVA.

Oksygen

Figur 17 syner resultat av oksygenmålingar ved Korsen, 2017-2023, i Økokyst programmet. Verdiane er fallande med djupet, til minimum ved botnen. Det er ein tydeleg årsvariasjon, med lågast verdiane om hausten. Dei låge minimumsverdiane (<50% mettingsverdi) har vore utslagsgjevande for degraderinga av miljøtilstanden i fjorden til 'Moderat' i 2017 og 2019.



Figur 17: Målt oksygenkonsentrasjon i Geirangerfjorden (Korsen) 2017-2023. Kjelde: NIVA.

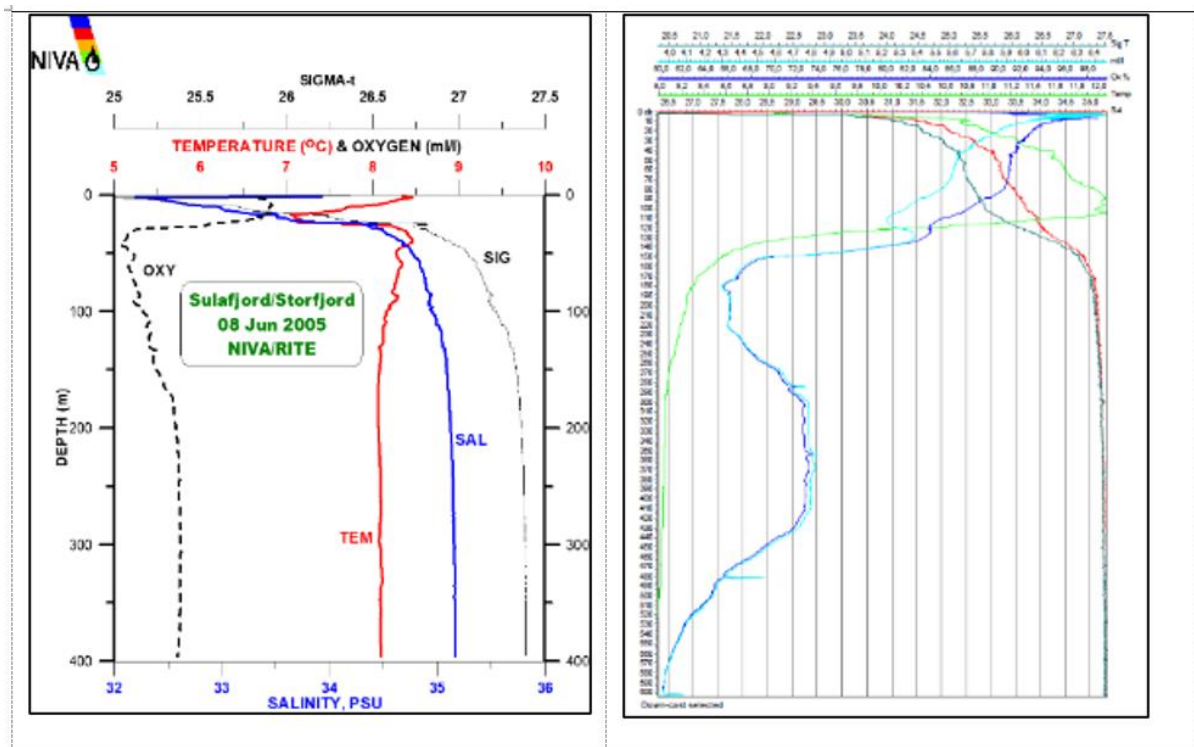
Overvaking av havbrukslokalitetane i Storfjorden (Hofseth) skjer regelmessig (MOM-B). Målingane er i stor grad i privat eige. Det er planar om eit stort landbasert oppdrettsanlegg i Raudbergvika, i Sunnylvsfjorden. Moglege konsekvensar for vassmiljøet er modellert og omtalt (Kvåle et al., 2023, DHI 2022).

Lokalt oksygenminimum i sjøen

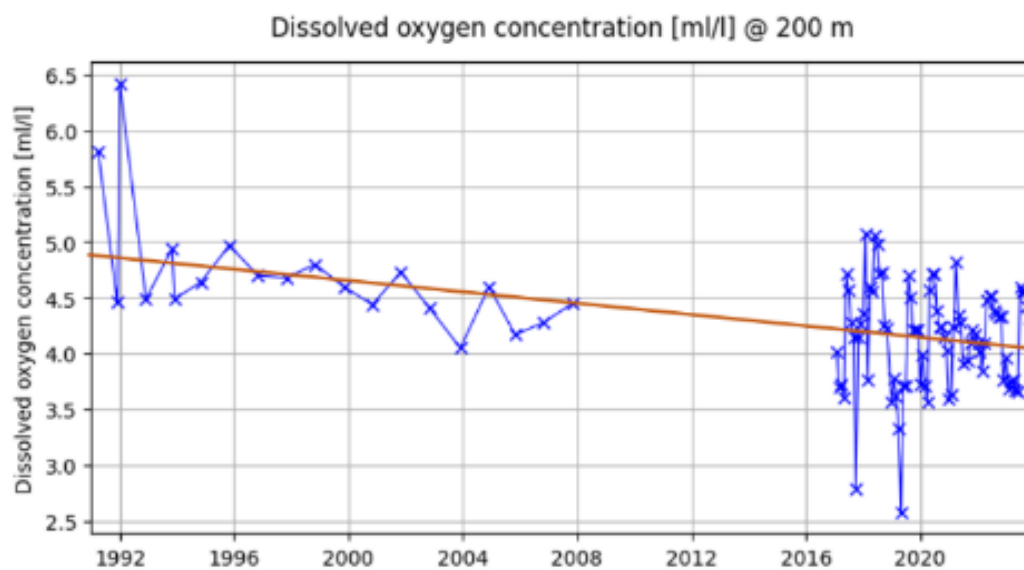
I Storfjorden framtrer det eit sjikt med lokalt, vertikalt minimum i oksygen. Sporadiske målingar indikerer at dette sjiktet ligg i området frå 50 m djup til rundt 250 m djup. Muligens er det djupare langt inne i fjorden, enn lenger ute, noko som målingar frå 2005 (Berge m fl. 2007, Ischida m.fl. 2013) og 2020 (Golmen m fl. 2024) indikerer (Figur 17). Slikt intermedieært oksygenminimum er hyppig observert i havet på lågare breiddegrader. Storfjorden kan såleis representere eit ‘mini-hav’.

Oksygenmålingane nær botnen ved Korsen nemnt over, er i djup som fell saman med sjiktet med oksygenminimum i Storfjorden. Lågt oksygeninnhald i dette sjiktet skriv seg sannsynlegvis frå prosessane med nedbryting og remineralisering av organisk nedfall frå overflatelaget (algar). Det foregår også særskilte fysisk/kjemiske prosessar i dette sjiktet i overgangen mellom det dynamiske og sesongmessig påverka overflatelaget og det meir stagnante djupvatnet.

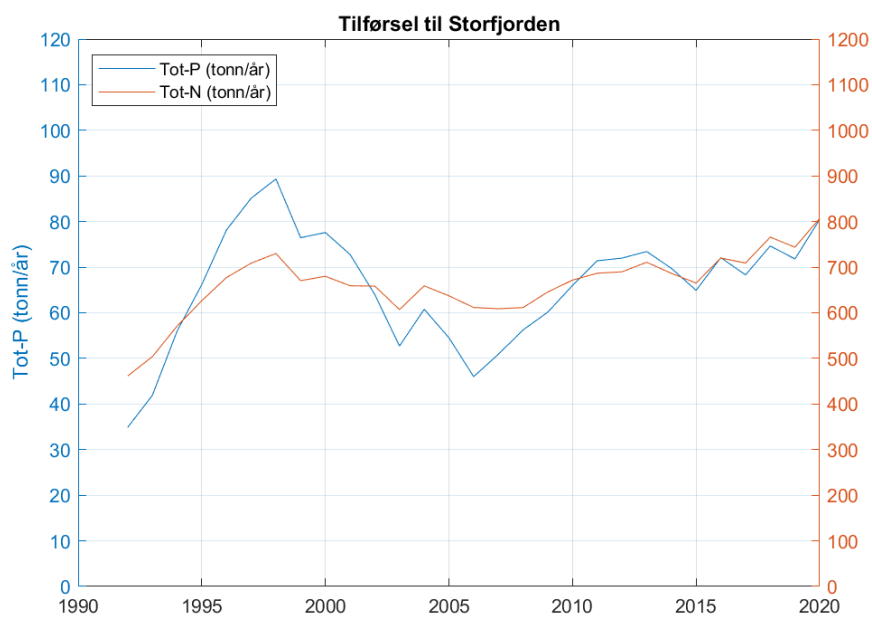
Ved å sjå på langtidstrenden framgår det at oksygeninnhaldet i sjiktet er på veg ned med om lag 0.7 ml/l over perioden (Figur 19). Dette kan kome av auka tilførsler til fjorden (tilførsel av nitrogen har auka med ein faktor 1.8 mens tilførsel av fosfor har auka med en faktor 2.3 (Figur 20). I samspel med klimateffektar kan dette forårsake endringane (Johnsen m. fl. 2021, 2024). Det kan også vere kopla mot storskala endringar i sirkulasjon i Storfjorden med endra dynamikk og djup av sjiktet med lågt oksygeninnhald (klima). Oksygentilhøve og hydrografi i det aktuelle sjiktet og ved botnen bør kartleggast for å forstå dynamikken i fjorden og vidare overvakast med omsyn til trend.



Figur 18: Hydrografisk profilar i Storfjorden. Til venstre: 8. juni 2005 (NIVA). Til høgre; 20. november 2020 (Runde miljøsentrum; blå kurve er oksygen). Eit mellomsjikt syner lokalt oksygenminimum.



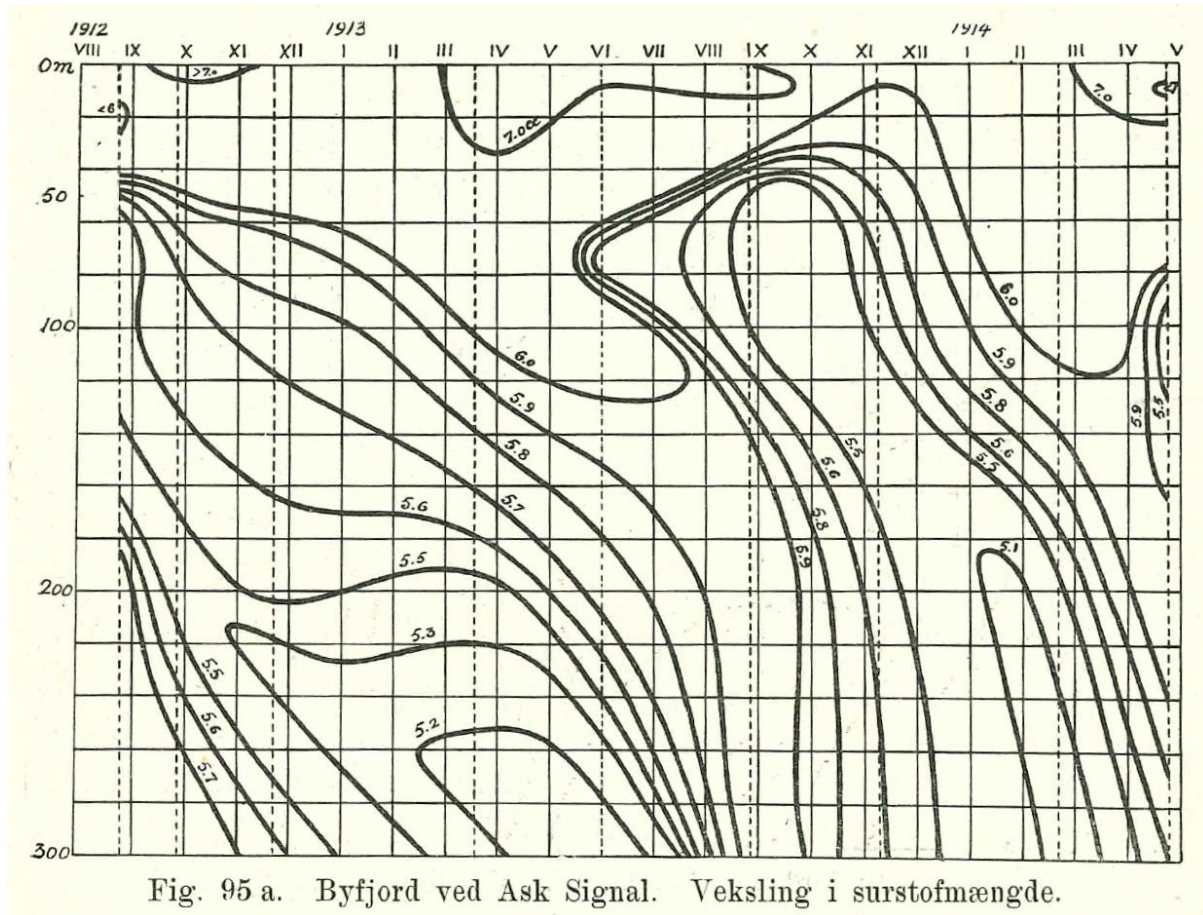
Figur 19: Oksygenmålingar i 200 m djup i Storfjorden frå 1991 til 2023. Første delen er frå ein stasjon (G5) i munningen av Norddalsfjorden, med måling om hausten med unntak av dei to høge verdiane i 1991 (vintermåling). Resten av målingane er frå Økokyst programmet, ved Korsen i Geirangerfjorden (NIVA 2024). Illustrasjon frå Golmen m. fl. 2024.



Figur 20: Tilførsel av N og P til Storfjorden fra hovednedbørsfelt 98, 99 og 100 basert på TEOTIL2.

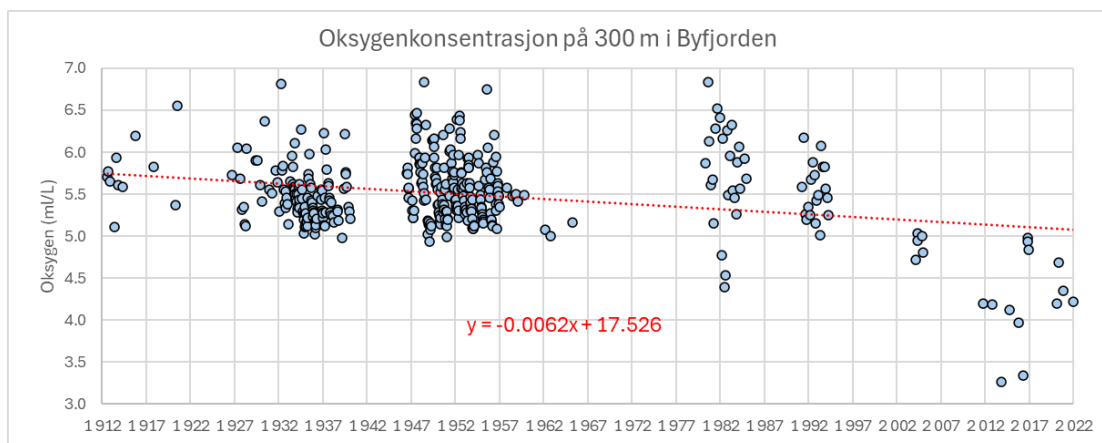
3.4 Forhold i Byfjorden utenfor Bergen

Gaarder (1916) presenterte de første oksygenmålingene fra norske terskelfjorder. De eldste dataene er fra 1912. En av stasjonene som ble besøkt var det som nå kalles Stasjon 4 i Byfjorden (60.43°N, 5.27°E). I Figur 21 vises konturplott av oksygenkonsentrasjon i ml/L, og de laveste oksygenverdiene på 300 m er 5.1 ml/L.

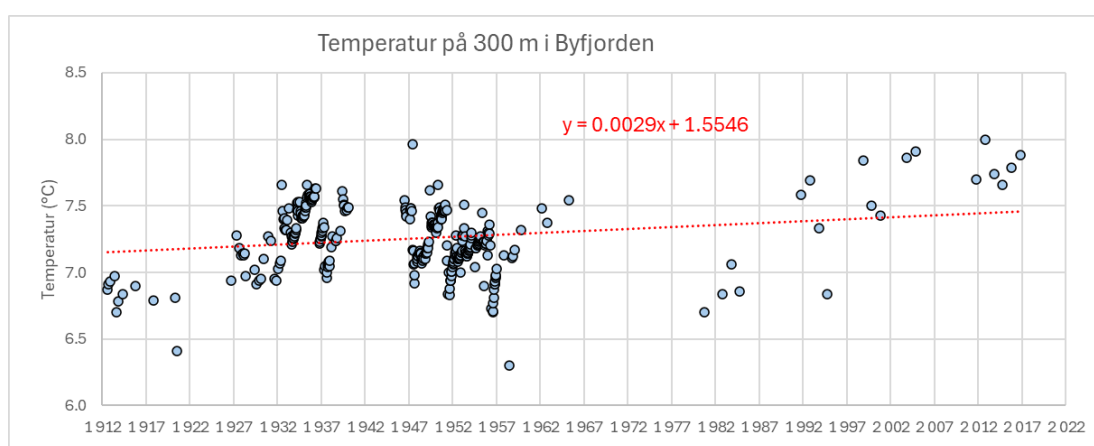


Figur 21: Oksygenkonsentrasjon i Byfjorden i 1912-1914. Figuren er hentet fra Gaarder (1916).

I Figur 22 vises målt oksygen på 300 m dyp i Byfjorden utenfor Bergen basert på måleserien som Gaarder startet. Sett over hele perioden er det en nedadgående trend på 0.06 ml/L per tiår, men oksygennivået ser ut til å holde seg relativt konstant helt fram til omtrent 2010. Før 2010 var oksygen klassifisert til svært god tilstand hele tiden etter Tabell 1. Etter dette ser det ut til å ha vært en brå nedgang i oksygentilstanden, hvor klassifiseringen havner i tilstandsklassen «god». I noen år har oksygenkonsentrasjonene vært under 3.5 ml/L som betyr at tilstanden blir «moderat». Dette betyr at vannforekomsten ikke oppnår målene som er satt i Vannforskriften.

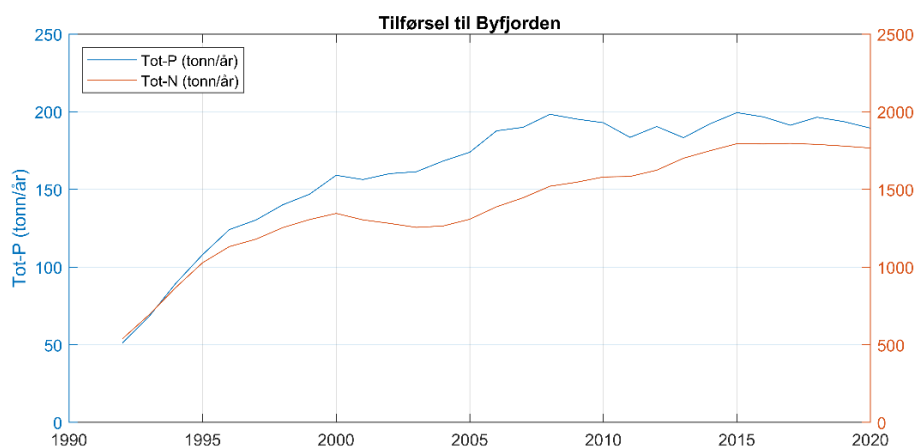


Figur 22: Målt oksygenkonsentrasjon på 300 m fra stasjon 4 i Byfjorden (60.43°N, 5.27°E).



Figur 23: Målt temperatur på 300 m fra stasjon 4 i Byfjorden (60.43°N, 5.27°E).

Nedgangen i oksygen i Byfjorden ser ut til å følges av en oppadgående trend i temperaturen i vannmassen (se Figur 23). Nedgangen i oksygen sammenfaller også med en kraftig økning i tilførsel av både nitrogen og fosfor til Byfjorden (se Figur 24). Senere i rapporten skal vi se på sammenheng mellom oksygenforhold og klima og tilførsel i Sognefjorden, men vi vil ikke gå nærmere inn på årsakssammenhenger i Byfjorden.

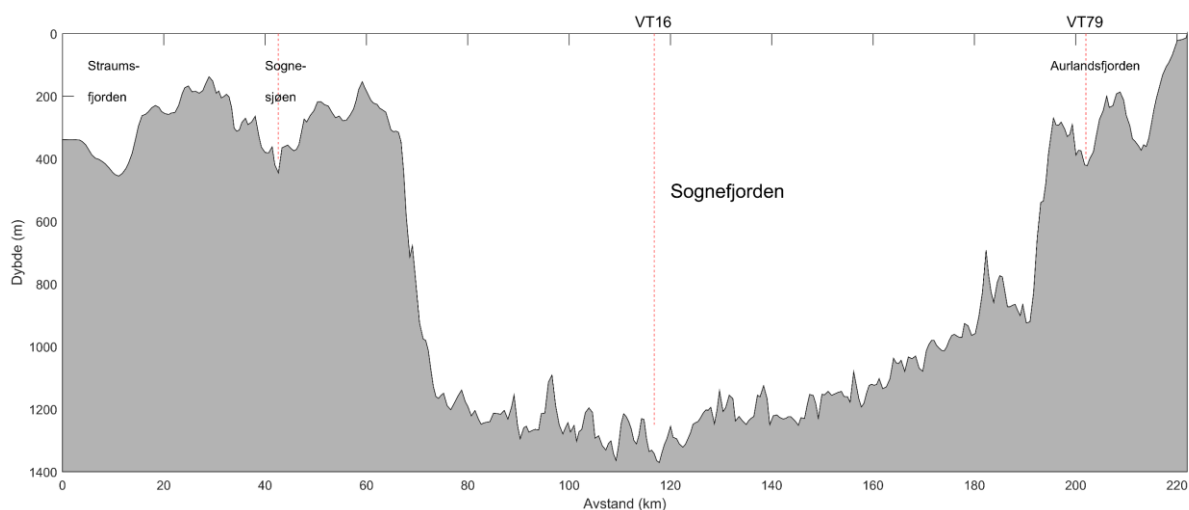


Figur 24: Tilførsel til Byfjorden beregnet med TEOTIL2. Tilførselen er summen av tilførsel til hovednedbørsfelt 056 og 059.

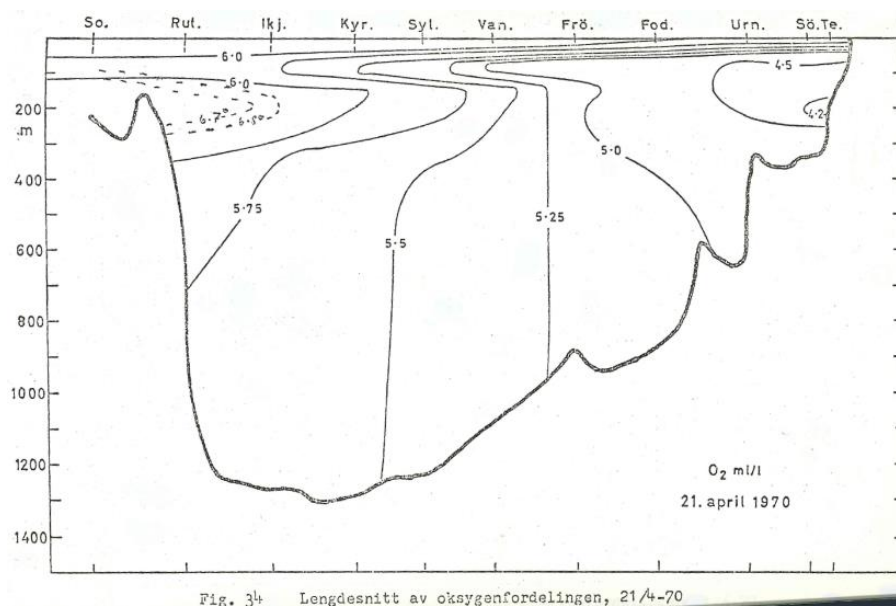
3.5 Forhold i Sognefjorden

I Figur 25 vises langsgående dybdeprofil av Sognefjorden fra Straumsfjorden via Sognesjøen, over terskelen på ca. 170 m dyp, gjennom dypbassenget i sentrale deler av Sognefjorden og inn Aurlandsfjorden. Sognefjorden er en av verdens lengste fjorder, og har et maksimalt dyp på litt over 1300 m.

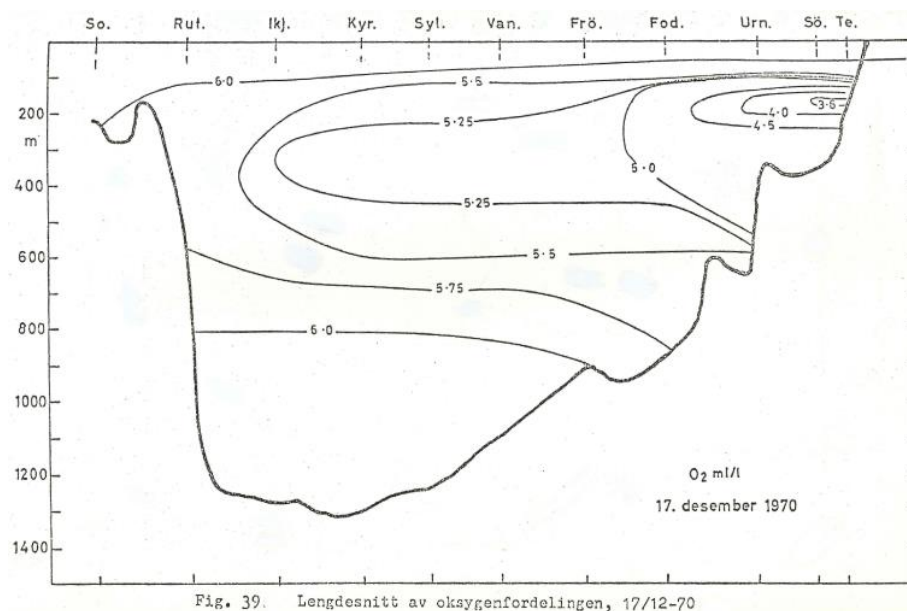
Hermansen (1974) gjorde målinger av oksygenforholdene i Sognefjorden før (se Figur 26) og etter (se Figur 27) en dypvannsfornyelse i året 1970. Før dypvannsfornyelsen var oksygenkonsentrasjonen mellom 5.25 og 5.75 ml/L på 1000 m dyp, mens den var over 6.0 ml/L etter dypvannsfornyelsen. Til sammenligning var gjennomsnittlig oksygenkonsentrasjon på 1000 m på stasjon VT16 4.6 ml/L i perioden 2017-2023, og det ble ikke høyere oksygenkonsentrasjon enn 5.2 ml/L (se Figur 28). Havforskningsinstituttet har også gjort målinger av oksygen i Sognefjorden. I Figur 28 vises også målt oksygen fra 1000 m fra stasjonen Brekke som ligger lenger ut i fjorden, men innenfor terskelen. Verdiene målt av Havforskningsinstituttet er av samme størrelsesorden som de fra stasjon VT16. Dette betyr at oksygennivået i Sognefjorden dypvann har gått ned omtrent 0.7-1.1 ml/L siden 1970.



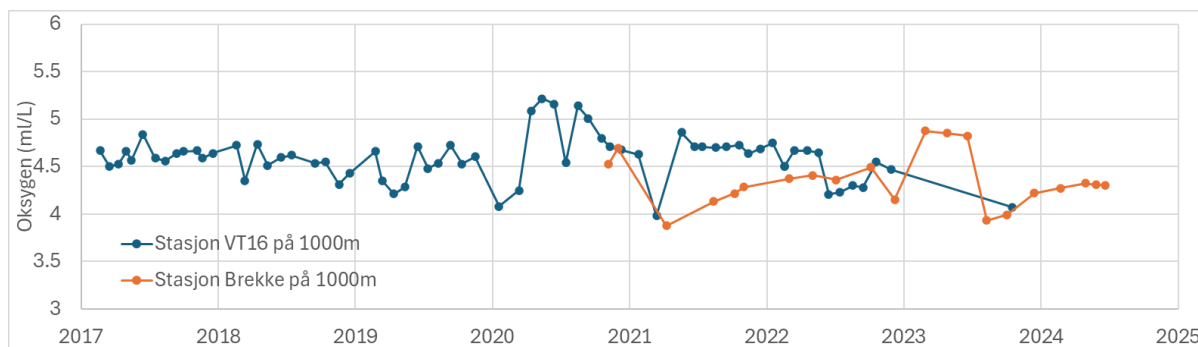
Figur 25: Langsgående dybdeprofil fra Straumsfjorden via Sognesjøen, innover Sognefjorden og inn til Flåm innerst i Aurlandsfjorden. De røde stiplede vertikale linjene indikerer plassering til stasjonene Sognesjøen, VT16 Kyrkjebø og stasjon VT79 Nærnes i Aurlandsfjorden.



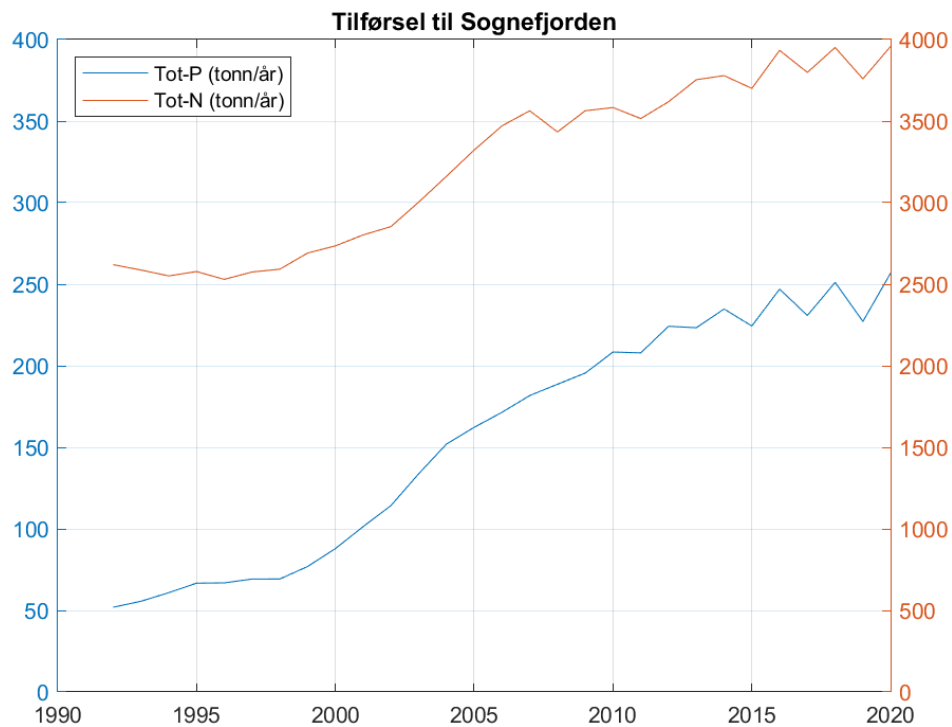
Figur 26: Oksygenforhold i Sognefjorden i forkant av en dypvannsfornyelse i 1970.



Figur 27: Oksygenforhold i Sognefjorden etter en dypvannsfornyelse i 1970.



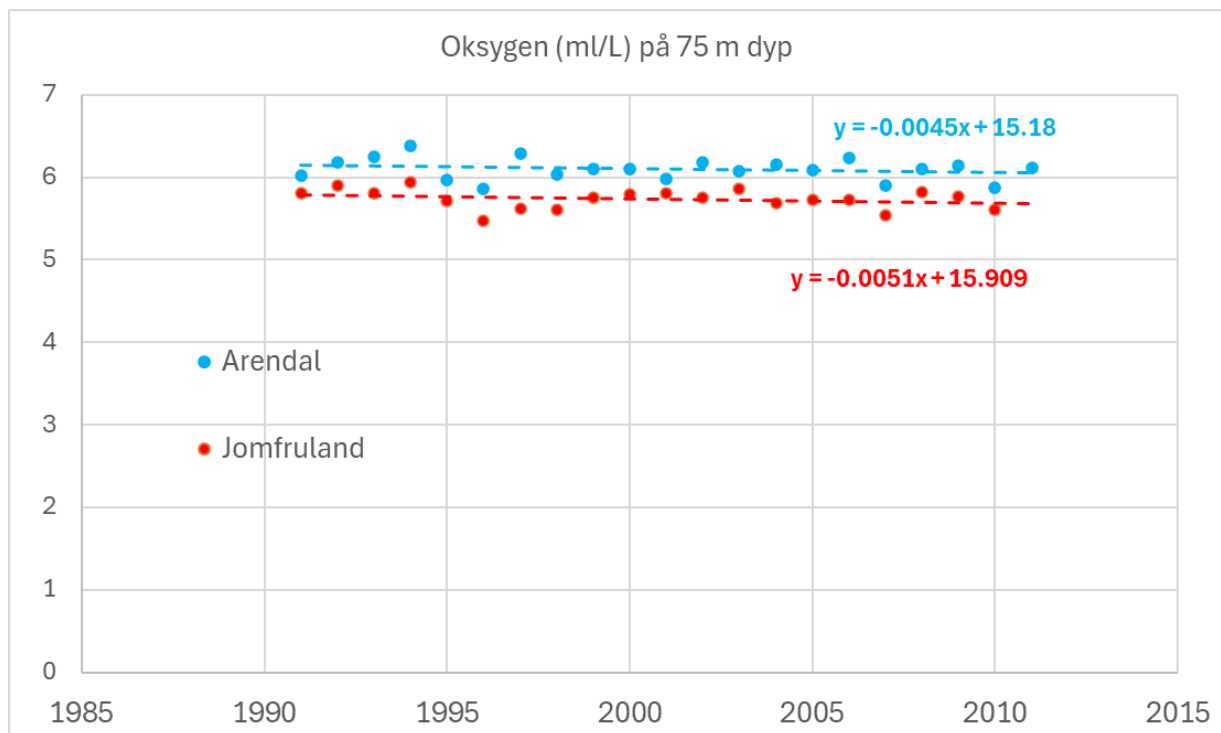
Nedgangen i oksygenkonsentrasjon kan skyldes at vannet utenfor fjorden har blitt varmere siden 1970, men økt tilførsel til fjorden kan også ha spilt en rolle. I Figur 29 vises tilførsel til Sognefjorden innenfor terskelen. Siden 1990-tallet har tilførselen av nitrogen økt med en faktor 1.5 og tilførsel av fosfor har økt med en faktor 3.4.



Figur 29: Tilførsel til Sognefjorden innenfor terskelen mellom Brosvika og Losna. Dette er tilførsel fra hovednedbørsfelt 69 til 80 beregnet med TEOTIL2.

3.6 Forhold i Skagerrak

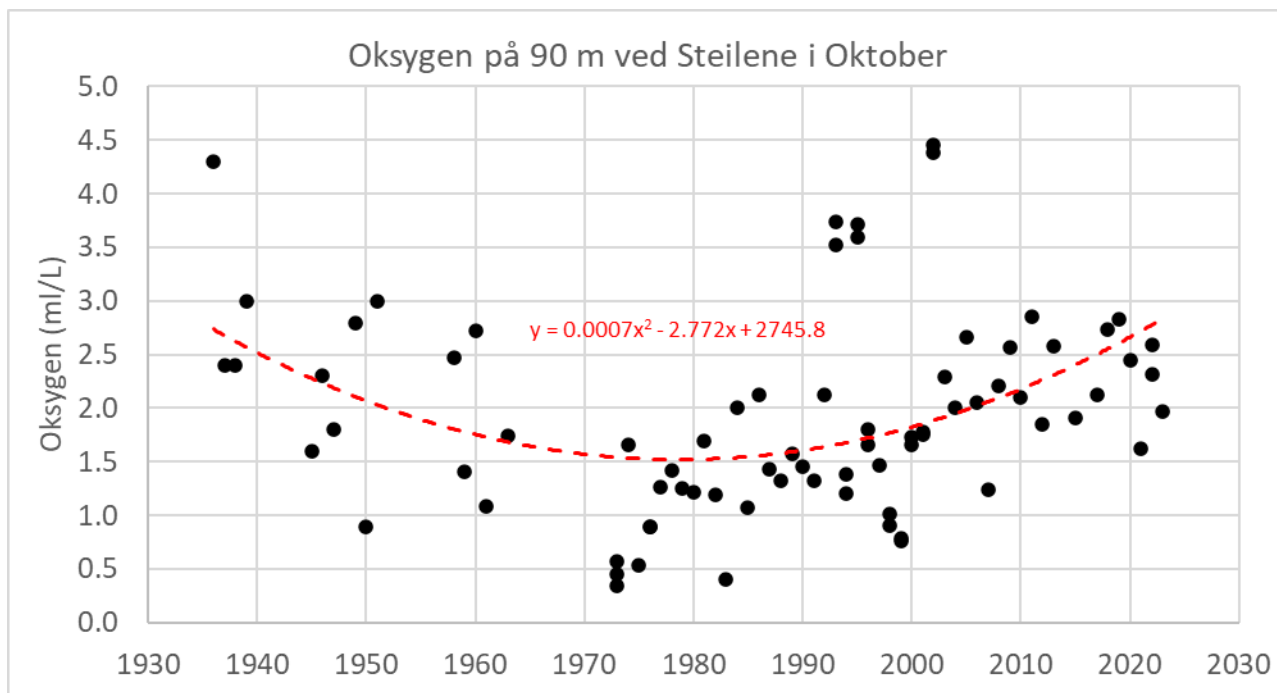
I Figur 30 vises oksygenforholdene på 75 m dyp ute i åpent hav i Skagerrak. De blå punktene er fra utenfor Arendal (58.383°N, 8.817°E) og de røde punktene er fra utenfor Jomfruland (58.850°N, 9.667°E). På disse stasjonene er det en svak, men ikke signifikant nedadgående trend. Galli et al. (2024) fant derimot at det er en tydelig nedadgående trend i sin modell-studie.



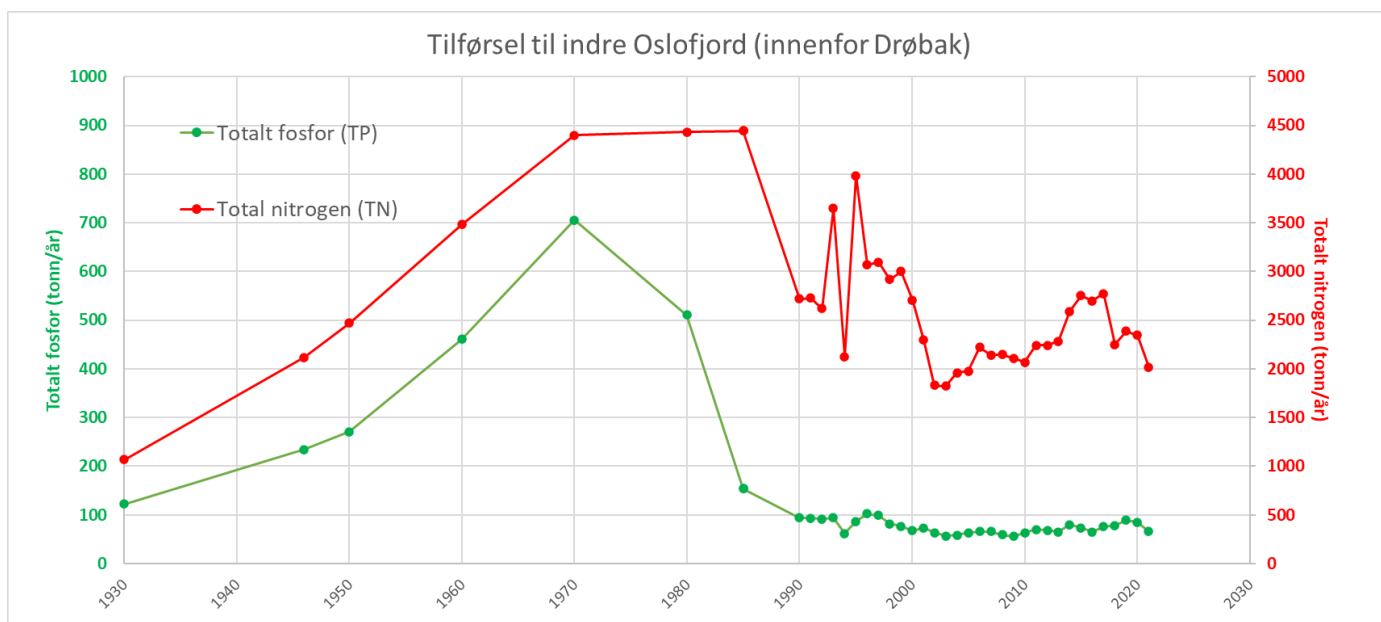
Figur 30: Oksygenkonsentrasjon midlet for hvert år det er data. Data både fra i kyststrømmen for Arendal og Jomfruland er fra 200 m dyp.

3.7 Forhold i Indre Oslofjord

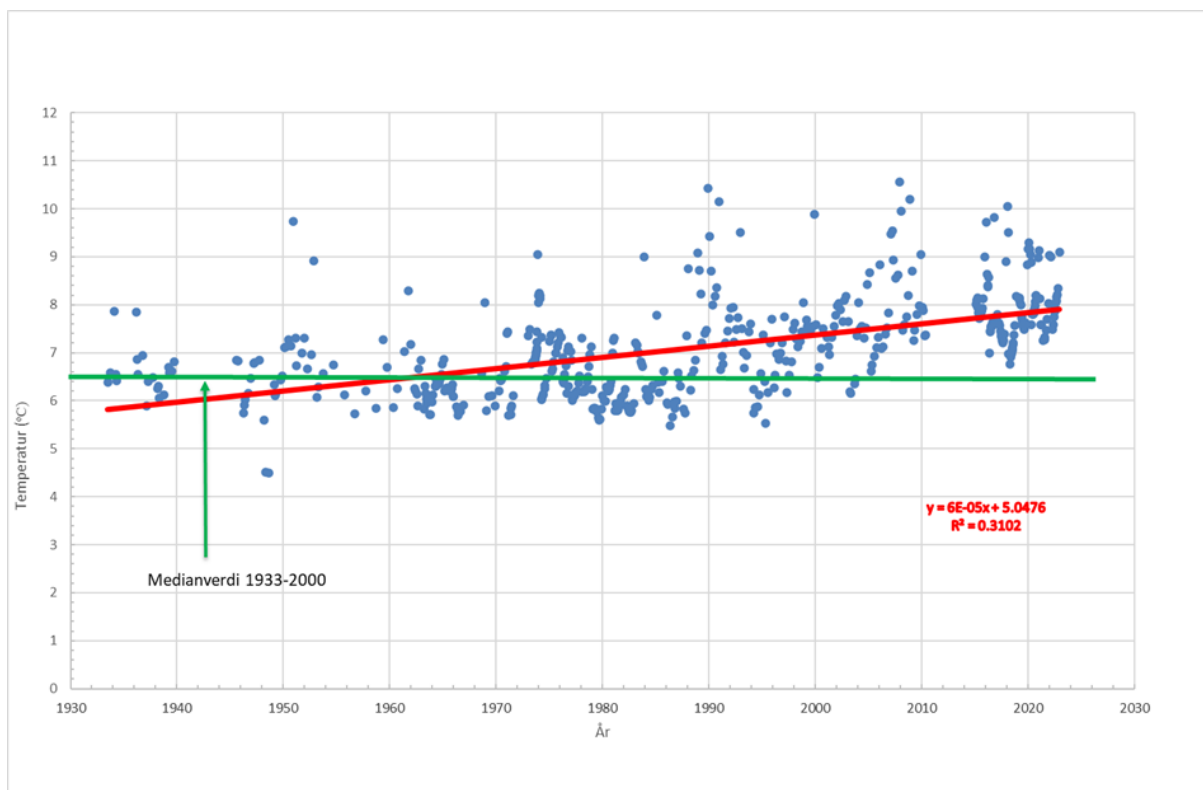
I Figur 31 vises målt oksygenkonsentrasjon på 90 m dyp i Vestfjorden som ligger på innsiden av Drøbakerskelen i Indre Oslofjord. I dette området har det vært store endringer i tilførsel i samme periode (se Figur 32), som kan forklare endringen i oksygenforhold. Temperaturen i dypet i Indre Oslofjord viser samme trend som for resten av norskekysten (se Figur 33), men de store endringene i tilførsel gjør at det er vanskelig å se eventuelle effekter av temperatur på oksygenforholdene.



Figur 31: Målt oksygen i oktober på 90 m dyp ved Steilene i Indre Oslofjord.



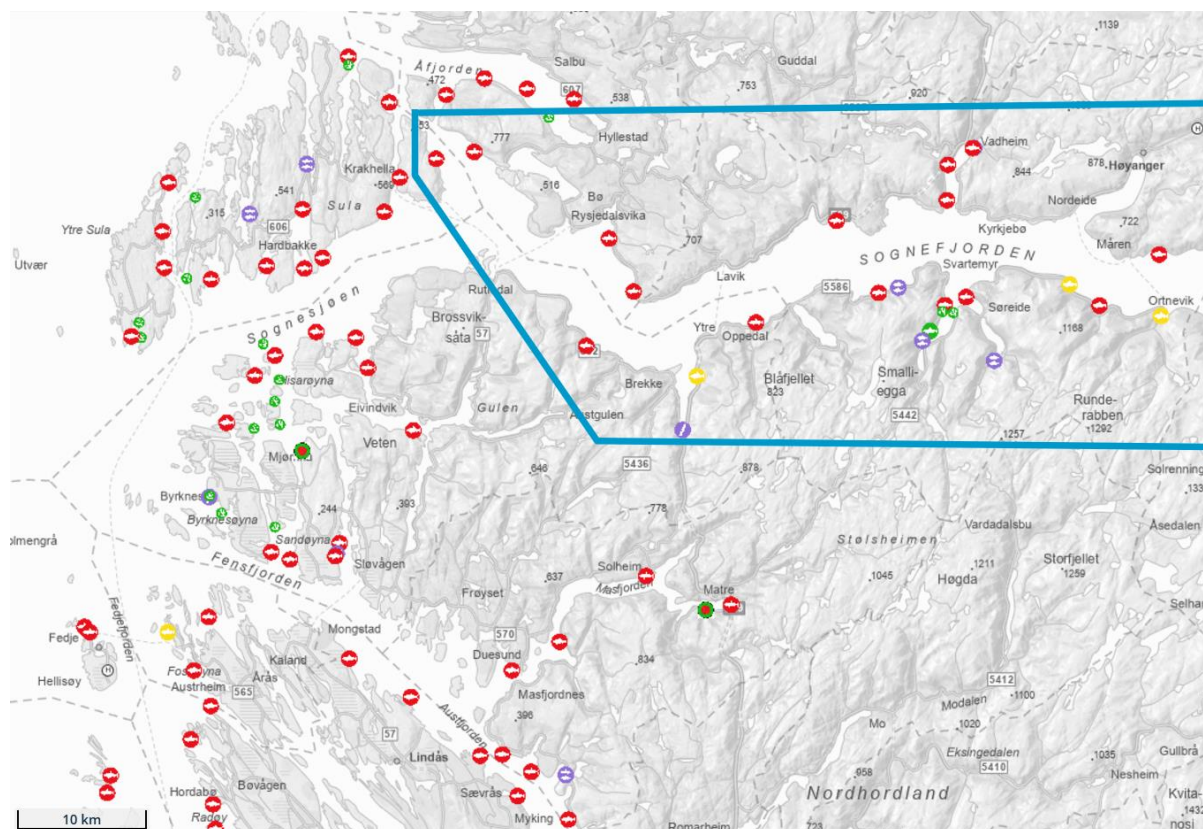
Figur 32: Tilførsel til Indre Oslofjord.



Figur 33: Temperatur (°C) på 80-90 meters dyp i Vestfjorden (Dk1) 1933 – 2022. Data fra Braarud og Ruud 1937, Dannevig 1945, Beyer og Føyn 1951, Havforskningsinstituttet Forskningsstasjonen Flødevigen (1952-61), Føyn og Andersen 1970-71 (pers med) og NIVA (1962-2022). Figuren er utarbeidet av Jan Magnusson.

4 Modellering av Sognefjorden

For å studere årsakssammenhenger som kan forklare endringer i oksygenforhold er det valgt å fokusere på området rundt Sognefjorden. I Figur 34 ser vi et kart over ytre del av Sognefjorden, hvor plassering av oppdrettsanlegg er tegnet inn. Det er mange oppdrettsanlegg i området, men ikke så mange i selve Sognefjorden. Det er ingen oppdrettsanlegg i indre del av fjordsystemet. Allikevel ser vi en stor økning i tilførsel til Sognefjorden. Tilførselen vist i Figur 29 er beregnet kun til området som er innenfor det blå polygonet i Figur 34, og tilførsel av nitrogen har økt med en faktor 1.5 og tilførsel av fosfor har økt med en faktor 3.4 siden 1990-tallet.



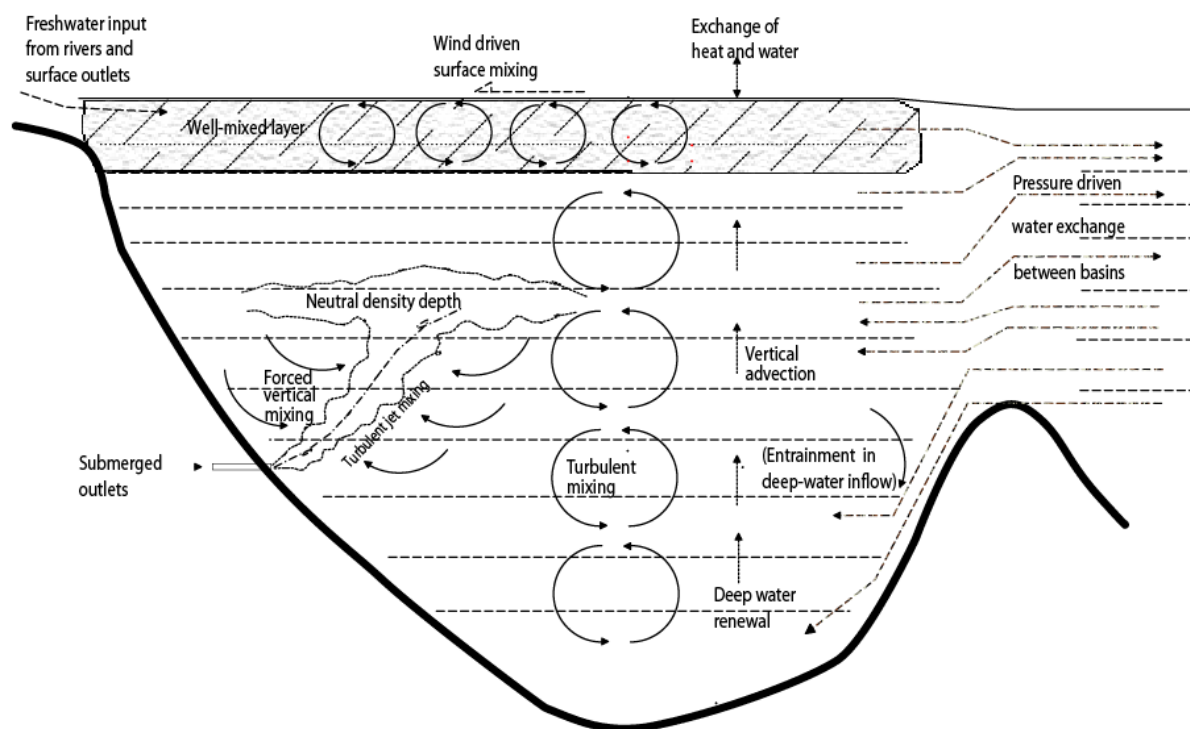
Figur 34: Kart over Sognefjorden hentet fra kystinfo.no hvor oppdrettsanlegg er tegnet inn (oppdrett av laks markert med rødt). Vi har brukt TEOTIL2 for å estimere all tilførsel til Sognefjorden innenfor terskelen. Det området som det er beregnet tilførsel for er markert med et blått polygon. Sognefjorden strekker seg videre innover i landet øst for kartet, men det er ingen oppdrettsanlegg utenfor kartutsnittet.

4.1 Oppsett av NIVA Fjordmodell

Vi benytter NIVA Fjordmodell for å modellere Sognefjorden. Modellen ble utviklet ved NIVA i forbindelse med at det skulle bygges nye renseanlegg i Indre Oslofjord. Den første modellkjøringen som ble gjort for Indre Oslofjord er beskrevet av Bjerkeng (1994a, 1994b). Modellen er designet for å vurdere hvordan forskjellige stoffer som organisk stoff, nitrogen, fosfor, silikat og oksygen spres gjennom det økologiske systemet i en terskelfjord. Slike vannforekomster er sårbare for tilførsel av stoff som leder til økt oksygenforbruk, på grunn av lang oppholdstid til dypvannet.

Modellen kan kalles en boks-modell og er bygd opp slik at den består av en eller flere bassenger som står i forbindelse med et ytre basseng. I hvert basseng beskrives variasjon med dyptet med høy oppløsning, som illustrert i Figur 35. Det tas også høyde for at dypvannsutslipp øker den vertikale blandingen. Utvekslingen mellom hvert basseng er drevet av tidevann, vind og forskjeller i trykk mellom vannmassene i to bassenger som står i forbindelse med hverandre. De fysiske prosessene som styrer modellen, er detaljert beskrevet av Bjerkeng (1994b, 1994c, 1994d). Lengden, bredden og dybden på forbindelsene mellom bassengene i fjorden, spesifiseres i modelloppsettet. Tilførsler til de indre bassengene, og om disse går til overflaten eller slippes ut med rør i dypet, beskrives også i modelloppsettet. I oppsettet for Sognefjorden er det lagt inn kun et basseng som beskriver hele Sognefjorden, og dette bassenget står i forbindelse med Sognesjøen.

Modellen beskriver separat budsjettet til de forskjellige næringssaltene samt karbon og oksygen, og har to forskjellige grupper fytoplankton; kiselalger og andre alger. De biologiske prosessene i modellen er detaljert beskrevet av Bjerkeng (1994b, 1994e, 1994f). For hver algetype regnes det ut innhold av karbon, nitrogen, fosfor og silikat (hvis det er kiselalger). Hvert stoff følges fra tilførsel, gjennom næringskjeden, i organisk stoff i vannmassene og i sedimentet. En sentral del av modellen består i å beregne oksygenforbruk når organisk stoff brytes ned. Modellen inneholder også en beskrivelse av forbruk og produksjon av karbon, nitrogen og fosfor som blåskjell står for (Bjerkeng, 1994f). Modellen har blitt brukt for å vurdere endringer i utslipp til Bunnefjorden og Bekkelagsbassenget i Indre Oslofjord (Staalstrøm, 2017, 2021) og for å vurdere mulige tiltak for å bedre vannkvaliteten i Hunnebu (Staalstrøm, 2019). Den har også blitt brukt for å modellere Drammensfjorden (Staalstrøm, 2022).



Figur 35: Illustrasjon av de forskjellige fysiske prosessene som er inkludert i NIVA Fjordmodell. Legg merke til at det i modellen blir simulert hvordan de vertikale blandingsforholdene endrer seg hvis man legger inn et dykket utslipp i bassenget.

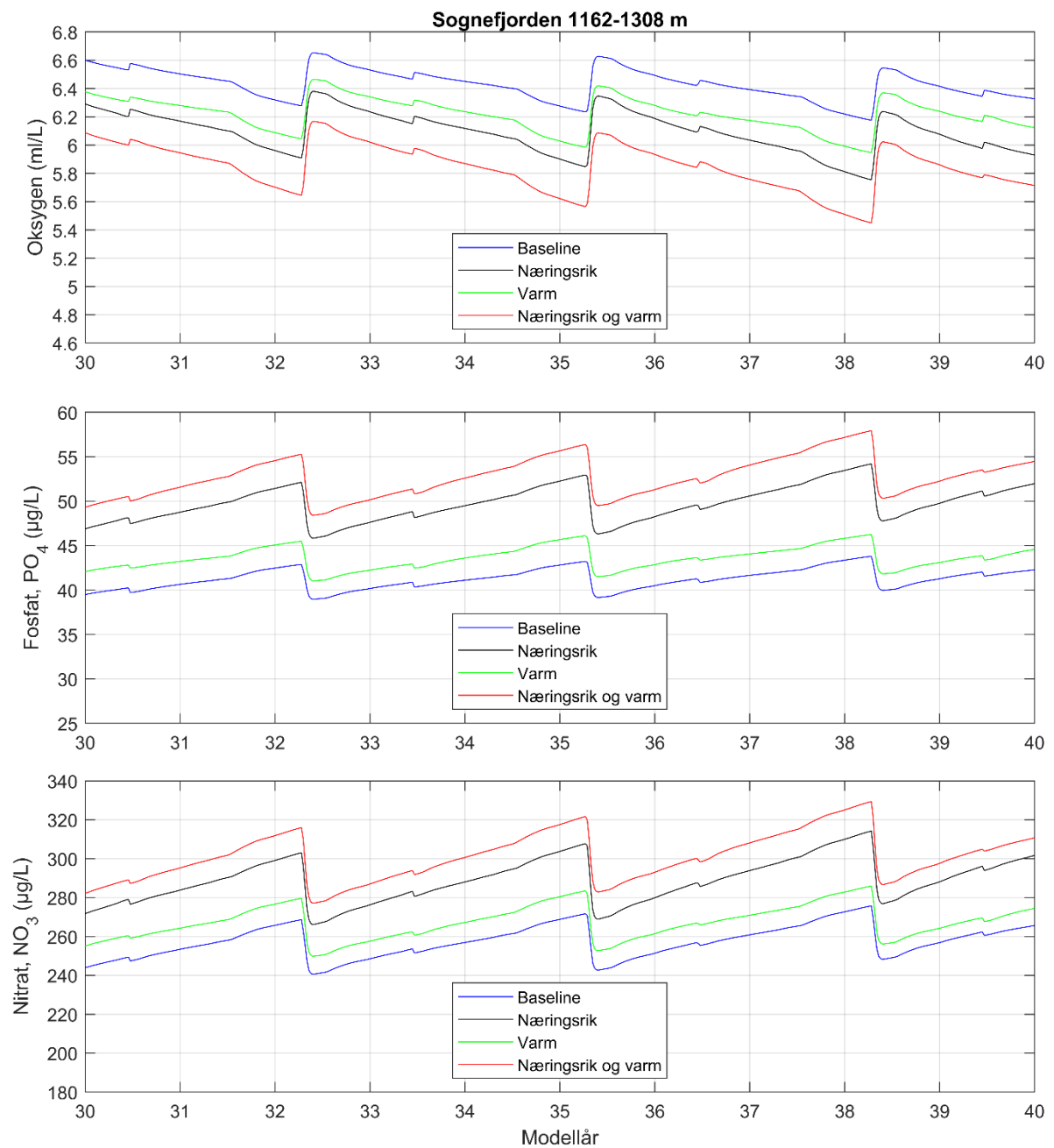
4.2 Resultater fra NIVA Fjordmodell

Det har blitt kjørt fire modellscenarier. I den første modellkjøringen beskrives forholdene i Sognefjorden slik de var i 1970-årene. Dette modellscenariet kalles «baseline». Dette modellscenariet sammenlignes med tre andre. I det som kalles «dagens tilstand», er det lagt inn varmere vann i Sognesjøen og høyere tilførsel. Da ser vi en nedgang i oksygenivået i dypvannet på 0.6 ml/L. Dette er litt mindre enn den observerte nedgangen i oksygen på rundt 0.7-1.1 ml/L, men er av samme størrelsesorden.

Det har også blitt kjørt scenarier hvor det kun er varmere vann i Sognesjøen (scenariet «varm»), og kun høyere tilførsel (scenariet «næringsrik»). Resultatene fra modellscenariene er vist i Tabell 2 og Figur 36. Av den totale nedgangen i oksygen mellom baseline og dagens situasjon, kan en tredel av nedgangen tilskrives klimaendringer og to tredeler tilskrives økt tilførsel. Ved økt tilførsel ser vi at det bygger seg opp høyere konsentrasjon av næringssalter i dypet. Det fins ikke data på utviklingen av næringssalter i dypet, men oksygen er overvåket grundig de siste årene. Det er verdt å merke seg at hyppigheten av dypvannsfornyelsene ikke endrer seg. Dette kan betyr høyere havtemperatur gjør at det er mindre oksygen i den vannmassen som strømmer inn i fjorden under dypvannsfornyelser.

Tabell 2: Resultater fra modellscenarier beregnet med NIVA Fjordmodell. Oksygen, fosfat og nitrat på 1200m dyp er vist.

Senario	Beskrivelse	Oksygen på 1200 m	PO ₄ på 1200 m	NO ₃ på 1200 m
Baseline	Temperatur og tilførsel som 1970	6.35 ml/L	41.1 µg P/L	257 µg N/L
Varm	Temperatur som i dag og tilførsel som 1970	6.15 ml/L	43.2 µg P/L	266 µg N/L
Næringsrik	Temperatur som 1970 og tilførsel som i dag	5.95 ml/L	50.0 µg p/L	292 mg N/L
Dagens tilstand	Temperatur og tilførsel som i dag	5.75 ml/L	52.5 µg P/L	302 mg N/L



Figur 36: Modellresultater fra NIVA Fjordmodell.

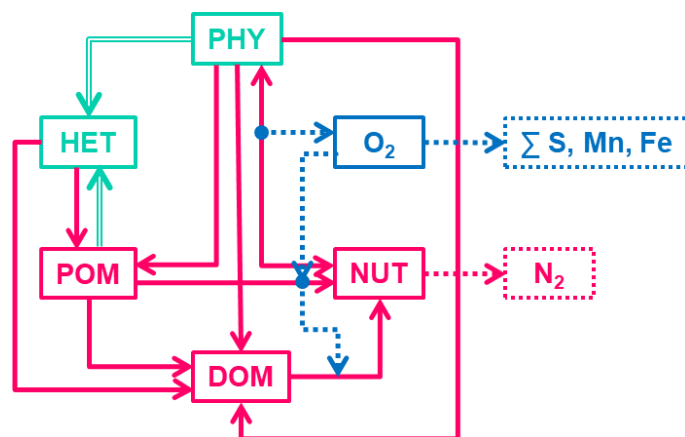
4.3 Oppsett av 3D havmodell (Oceananigans-OxyDep)

I dette prosjektet startet vi også beregninger med en 3-dimensjonal koblet hydrodynamisk-biogeokjemisk modell Oceananigans-OxyDep. Hensikten er å kunne se på forskjeller innad i bassenger som Sognefjorden. Den tredimensjonale hydrodynamiske modellen Oceananigans (Ramadhan et al. 2020) og den biogeokjemiske modellen OxyDep ble brukt på SognesfjordSognefjord-området med sikte på å beregne detaljer om oksygenregimet i forskjellige fjordregioner og dybder og utføre 4D-kartleggingen med sikte på å få tidsvariasjon av de beregnede fordelinger påvirket av naturlige og menneskeskapte faktorer.

Oceananigans⁶ er en allsidig programvarepakke designet for å simulere væskedynamikk. Den kan modellere både hydrostatiske og ikke-hydrostatiske strømninger basert på Boussinesq-ligningene (Ramadhan et al. 2020). En nøkkelstyrke til Oceananigans er dens evne til å kjøre effektivt på både sentrale prosesseringsenheter (CPU) og grafikkbehandlingenheter (GPUer), med spesielt høy ytelse på GPUer. Det som imidlertid skiller Oceananigans er det svært fleksible brukergrensesnittet, som forenkler oppsettet av grunnleggende simuleringer samtidig som det muliggjør komplekse og tilpassede simuleringer, noe som gjør det til et kraftig verktøy for et bredt spekter av applikasjoner.

OxyDep ble opprinnelig designet for modellering av oksygenmangel i fjorder (Yakushev et al. 2013). Her bruker vi en modifisert versjon av OxyDep-modellen (Figur 37) (Berezina et al. 2021). OxyDep-koden skrevet på nytt i programmeringsspråket Julia etter OceanBioME-rammeverket (Strong-Wright et al. 2023) for å kunne kobles med Oceananigans-modellen. Vi beholdt flertallet av OxyDep-parametriseringene (dvs. for hav-luftgassutveksling, begrensning med næringsstoffer og temperatur), men brukte avhengighet av lys vertikal fordeling og sesongvariasjon tilgjengelig i OceanBioME.

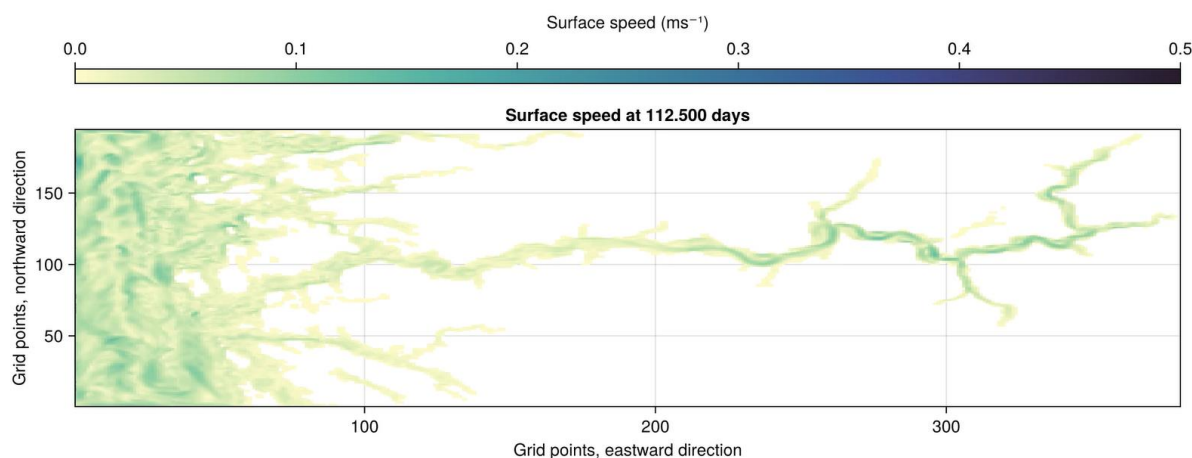
Modellen inkluderer nøkkelkomponenter som funksjonelle planktongrupper (PHY for planteplankton og HET for heterotrofer), oppløst og partikulært organisk materiale (DOM og POM), næringsstoff (NUT) og oppløst oksygen (O₂). OxyDep tilbyr en strømlinjeformet og generalisert representasjon av viktige biogeokjemiske prosesser som forekommer i vannsøylen og ved grensesnittet mellom vann og sediment.



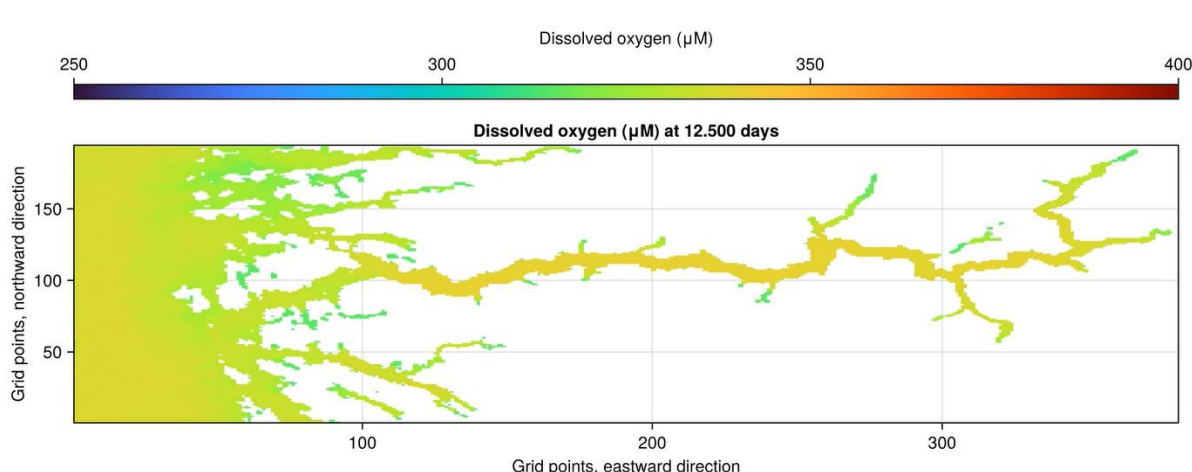
Figur 37: Flytskjema for OxyDep-modellen som illustrerer strukturen og interaksjonene i modellen, og viser flyten av biogeokjemiske prosesser som simulerer endringer i de modellerte parametrene fytoplankton (PHY), heterotrofe organismer (HET), oppløst og partikulært organisk stoff (DOM og POM), næringsstoffer (NUT) og oksygen (O₂).

⁶ [Home - Oceananigans.jl](https://home.oceananigans.jl)

Først ble det utført innledende kjøring av modellen hvor fjordens sirkulasjon blir beregnet. I Figur 38 vises overflate strømhastighet. Et flekkete sirkulasjonsmønstrene trer fram, og dette understreker rollen til småskala virvler.



Figur 38: Modellområdet for den koblede hydrodynamiske (Oceananigans) og biogeokjemiske (OxyDep) modellen, som omfatter Sognefjorden og de tilknyttede havområdene. Dybde (i m) er vist som en fargeskala. Vertikale og horisontale akser er merket med tall på rutenettnodene til modellen. Overflatestrømhastighet er vist i en fargeskala.



Figur 39: Fordeling av oppløst oksygen i overflatelaget

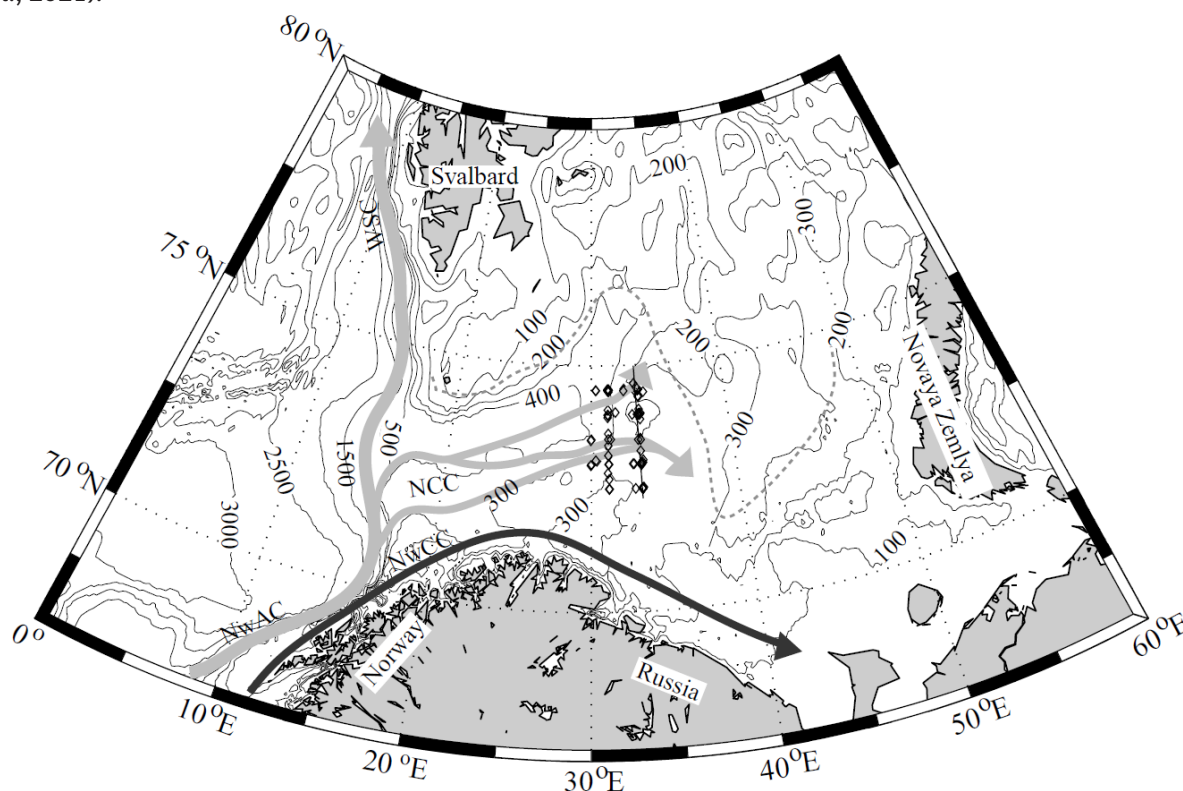
Horisontal fordeling av løst oksygen i overflatelaget (Figur 39) viser påvirkning av ferskvannstilførsel på oksygenkonsentrasjonene i fjordsystemet.

Denne modellen er planlagt brukt til å forutsi oksygenkonsentrasjonen i fjorden (med spesiell vekt på bunnelaget) og dens sesongmessige, mellomårige og tiårige dynamikk. Spesielt vil det være mulig å forutsi endringer av bunnområder med hypoksiske og anoksiske forhold under påvirkning av klima og tilførsel. I denne rapporten presenteres kun data fra overflatelaget.

5 Diskusjon og konklusjon

5.1 Utveksling mellom atmosfæren og havets vannmasser

Oksygen er grunnleggende for biologiske og biogeokjemiske prosesser i havet. Nedgang i oksygenkonsentrasjon kan forårsake store endringer i primærproduksjon, produktivitet, biologisk mangfold og biogeokjemiske sykluser. I det åpne hav regnes global oppvarming som den primære årsaken til pågående reduksjonen i mengde oksygen. Numeriske modeller anslår ytterligere oksygennedgang i løpet av det 21. århundre. Stigende globale temperaturer reduserer oksygenløseligheten i vann, øker oksygenforbruket via respirasjon, og er spådd å redusere tilførsel av oksygen fra atmosfæren og fra overflatevannet inn i havets indre på grunn av økt lagdeling og svekket vertikal sirkulasjon (Breitburg et al., 2021).



Figur 40: Kart over det vestlige og sentrale Barentshavet som viser de viktigste havstrømmene. Den stiplede linjen indikerer den gjennomsnittlige posisjonen til polarfronten. Diamanter viser plasseringen av stasjonene som ble brukt i studien. Stasjonene som ligger langs den rette linjen ved 33.5°E er fra Kola-transektet, og utgjør hoveddelen av stasjonene i datasettet. NwAC= den norske Atlanterhavstrømmen, NwCC = den norske kyststrømmen, NCC: Nordkappstrømmen, WSC: Vestspitsbergstrømmen. Batymetrien er basert på ETOP5-datasettet, og tegnet for hver 100m ned til 500m, og for hver 500m dypere enn det.

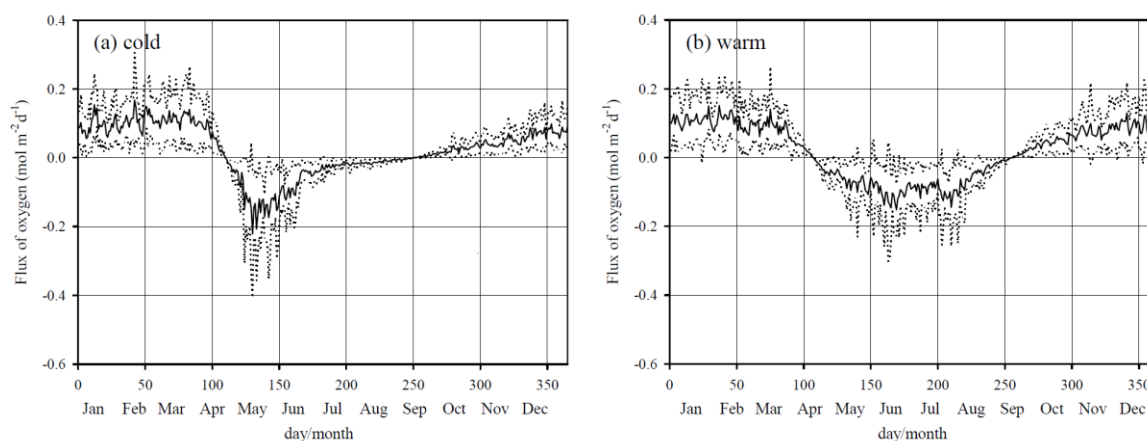
Data fra Barentshavet (se kart i Figur 40) ble analysert av Olsen et al. (2012). Dette arbeidet er hovedsakelig basert på data fra den såkalte Kola-transekten, lokalisert ved 33.5°E i Barentshavet (se Figur 5). En av forfatterne av denne rapporten (Yakushev) var med på å kvalitetssikre disse dataene og overføre dem til NOAA sin database⁷. Dette transektet har blitt besøkt på rutinebasis av sovjetiske og russiske forskningsfartøy siden ca. 1900 (Matishov et al., 1998), og dekker både kyst-, atlanterhavs- og

⁷ <https://www.ncei.noaa.gov/access/world-ocean-database-select/bin/dbsearch.pl>

polardomenene i det sentrale Barentshavet. Dataene viser tydelige sesongvariasjoner, med dannelse av overflatestratifisering, våroppblomstring og produksjon av oksygen som det mest tilbakevendende trekk, som finner sted mellom april og juni.

Det ble funnet at det årlige opptak av oksygen fra atmosfæren i den atlantiske delen av det sentrale Barentshavet er redusert med ca. 20 % i varme sammenlignet med kalde år. Dette er hovedsakelig forårsaket av økt utgassing om sommeren i varme år. Den årlige fluks av oksygen til de øverste 150 m i regionen er rundt 8–11 mol O₂/m²/år. Derfor øker det årlige opptak av atmosfærisk oksygen med 20 % i de kalde årene.

Derfor kan vi konkludere med at oppvarming vil føre til en reduksjon av oksygeninnholdet i overflatevannet. Dette vil igjen påvirke områder som Sognefjorden, hvor mindre oksygen i vannet på utsiden av fjordsystemet, fører til nedgang i hele vannmassen innenfor terskelen.



Figur 41: Estimert fluks av oksygen til overflatelaget på grunn av utveksling mellom luft og sjø (F_{air}) i kalde (a) og varme (b) år. Positive verdier indikerer en fluks fra atmosfæren og til overflatelaget. Stiplede linjer indikerer standardavviket i F_{air} forårsaket av et variabelt vindfelt.

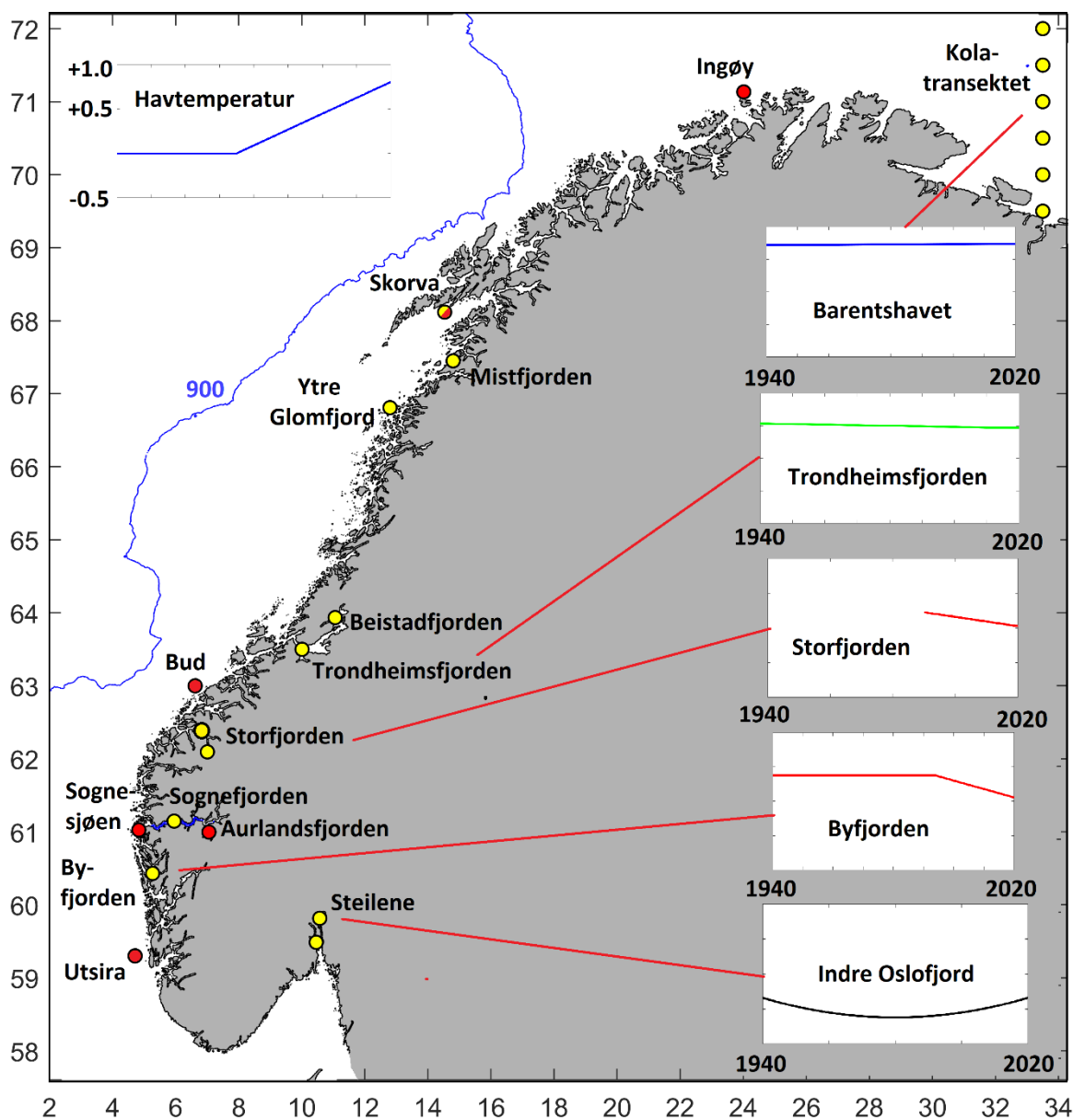
5.2 Dobbel påvirkning – klima og tilførsel

Aure (2015) så på tilførsel av organisk stoff fra oppdrettsnæringa i fjordbasseng med dype terskler. For Hardangerfjorden ble det beregnet at en fiskeproduksjon på 50000 tonn per år kun føret til en reduksjon i oksygenminimumet i dypvannet på 0.05 ml/L. Årsaken til at beregnet effekten var såpass liten ble forklart med at fjordbassenget har et stort volum, og at naturlig tilførsel er stor relativt til tilførsel fra oppdrettsnæringa. I dette prosjektet har vi ikke sett på tilførsel til Hardangerfjorden, så en videre analyse av dette får bli tema for et fremtidig prosjekt. I dette prosjektet har vi derimot sett på tilførsel til Sognefjorden, som også har et stort volum og mye ferskvannstilførsel. Her fant vi at nedgangen i oksygenminimumet var minst ti ganger så stort som det Aure fant i Hardangerfjorden. Vi mistenker at Aure (2015) undervurderer organisk belastning som stammer fra primærproduksjon fra planteplankton.

Primærproduksjon fra planteplankton er drevet av økt tilførsel av næringssalter, og dette fører til større organisk belastning, som gir nedgang i oksygenivået. Den økningen i havtemperatur som vi ser langs hele norskekysten og som også sammenfaller med globale trender, gjør at fjordene tåler mindre tilførsel av næringssalter og organisk stoff.

5.3 Oppsummering av resultatene

Resultatene for observasjoner som er analysert i dette prosjektet er oppsummert i Figur 42. Langs hele norskekysten har vann på 150 m dyp blitt 0.6-0.7 grader varmere de siste 35-40 år. Dette samsvarer med globale trender i havtemperatur. Dette er vist som en tidstrend i øvre venstre hjørne i kartet.



Figur 42: Oppsummering av resultatene i prosjektet. Tidstrendene går fra 1940 til 2020. Havtemperaturen er basert på målinger i 150 m dyp på stasjonen Sognesjøen, men tilsvarende trender ser vi langs hele norskekysten. Oksygentrendene er vist som tidstrender til høyre i kartet og verdien på y-aksene går fra 0 til 8 mL/L.

Det er ingen signifikante endringer i oksygenkonsentrasjonen i de åpne vannmassene utenfor norskekysten, men datagrunnlaget er begrenset. I de samme åpne vannmassene har det vært en tydelig oppvarming av vannet. For å se på trender i de nordligste områdene er det benyttet data fra Barentshavet,

og her er det ingen trend i oksygenforholdene. I Trondheimsfjorden er det en svakt nedadgående trend, men denne er ikke signifikant.

Data fra norske fjorder sør for Trondheim viser at oksygenkonsentrasjoner har sunket mange steder. I indre deler av Storfjorden innenfor Ålesund har oksygenkonsentrasjonene sunket 0.5-1.0 ml/L i perioden 1991-2023. Den samme nedgangen finner en på 1000 m dyp i Sognefjorden i perioden 1970-2020. I mange andre terskelfjorder på Vestlandet er det også rapportert om nedgang i oksygenkonsentrasjonen. Den lengste tidsserien vi har fra Byfjorden utenfor Bergen. Her var oksygenforholdene stabile fram til 1990-tallet, mens det har vært en klar nedgang i perioden etter dette.

Tilførsel til Sognefjorden innenfor terskelen ved Losna har økt med en faktor 1.5 for nitrogen og 3.4 for fosfor. Ved modellering av oksygenforholdene i Sognefjorden kan omtrent to tredeler av nedgangen i oksygenkonsentrasjon tilskrives økt tilførsel og den siste tredjedelen økt havtemperatur.

6 Referanser

- Aksnes, D. L., Aure, J., Johansen, P. O., Johnsen, G. H., & Salvanes, A. G. V. (2019). Multi-decadal warming of Atlantic water and associated decline of dissolved oxygen in a deep fjord. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 228, 106392.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272771419304056>
- Aure, J. (2015). Omsetning av tilført partikulært organisk materiale i fjordbasseng med dype terskler. *Fisken og havet*, nr. 1/2015, 20 sider, https://imr.brage.unit.no/imr-xmlui/bitstream/handle/11250/2374184/FoH_1-2015.pdf?sequence=1
- Berg, A. S., Fauskanger, L., Muggerud, K. K., & Århus, R. H. (2017). Vannkraft–Naturens pris. Effekter på hydrografisk og økologiske forhold i Sognefjorden (Bachelor's thesis).
<https://hvlopen.brage.unit.no/hvlopen-xmlui/handle/11250/2467516>
- Berge, J. A., & Amundsen, R. (2016). Reker i Indre Oslofjord-overvåking i perioden 2000-2014.
- Bernhard, J.M., Sen Gupta, B.K. (1999). Foraminifera of oxygen-depleted environments. In: *Modern Foraminifera*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/0-306-48104-9_12
- Beyer, F og Føyn, E., 1951. Surstoffmangel i Oslofjorden. En kritisk situasjon for fjordens dyrebestand. *Naturen* 75: 289-306.
- Bjerkeng, B. (1994a) Eutrofimodell for indre Oslofjord. Rapport 1: Praktisk utprøving på indre Oslofjord. NIVA rapport 3112-1994. 96 sider.
- Bjerkeng, B. (1994b) Eutrofimodell for indre Oslofjord. Rapport 2: Faglig beskrivelse av innholdet i modellen. NIVA rapport 3113-1994. 134 sider.
- Bjerkeng, B. (1994c) Eutrofimodell for indre Oslofjord. Rapport 3: EDB-teknisk beskrivelse og praktisk brukerveiledning. NIVA rapport 3114-1994. 107 sider.
- Bjerkeng, B. (1994d) Eutrofimodell for indre Oslofjord. Rapport 4: Fysiske prosesser. Litteraturstudium og dataanalyse. NIVA rapport 3115-1994. 107 sider.
- Bjerkeng, B. (1994e) Eutrofimodell for indre Oslofjord. Rapport 5: Fytoplankton-prosesser – et litteraturstudium. NIVA rapport 3116-1994. 165 sider.
- Bjerkeng, B. (1994f) Eutrofimodell for indre Oslofjord. Rapport 6: Filtring og vekst hos blåskjell som funksjon av miljøforhold. NIVA rapport 3117-1994. 78 sider.
- Bollingberg, I. M., Dale, T., Paetzel, M., & Nilsen, M. (2022). Tilstandsrapport for Aurlandsfjorden og Nærøyfjorden. HVL-rapport frå Høgskulen på Vestlandet nr. 4
<https://hvlopen.brage.unit.no/hvlopen-xmlui/handle/11250/2995983>
- Braarud, T. og Ruud, J.T., 1937: The hydrographic conditions and aeration of the Oslo Fjord 1933-34. *Hvalråd. Skr.*, 15: 1-56.
- Breitburg, D., Levin, L. A., Oschlies, A., Grégoire, M., Chavez, F. P., Conley, D. J., ... & Zhang, J. (2018). Declining oxygen in the global ocean and coastal waters. *Science*, 359(6371), eaam7240.

- Dannevig, A., 1945. Undersøkelser i Oslofjorden 1936-50. Fiskeridirektoratets skrifter, Serie: Havundersøkelser. Vol. VIII. No 4.
- DHI (2022): Modellering av vassutskifting i Raudbergvika. Rapport DHI 09.06. 2022, 51s.
- Dyb, J E, S Tuene og J E Rønneberg (2003): Storfjordundersøkelsen. De12 - Hydrografi i Storfjorden, historisk oversikt. Rapp Møreforskning Å0322, 52s.
- Dommasnes, A., Rey, F., & Røttingen, I. (1994). Reduced oxygen concentrations in herring wintering areas. ICES Journal of Marine Science, 51(1), 63-69.
<https://academic.oup.com/icesjms/article/51/1/63/760303>
- Egge, E., Bekkby, T., Borgersen, G., Eikrem, W., Fagerli, C. W., Gitmark, J. K., Frigstad, H., Harvey, T., Kistenich, S., Kvile, K. Ø. & Mengeot, C. (2024) ØKOKYST – DP Norskehavet Sør, Årsrapport 2023. Rapport Miljødirektoratet M-2790, 2024, 52s.
<https://www.miljodirektoratet.no/publikasjoner/2024/juni-2024/okokyst--dp-norskehavet-sor--arsrapport-2023/>
- Gade, H. G. (1973). Deep water exchanges in a sill fjord: a stochastic process. Journal of physical Oceanography, 3(2), 213-219. https://journals.ametsoc.org/view/journals/phoc/3/2/1520-0485_1973_003_0213_dweias_2_0_co_2.xml
- Gade, H. (2004) The Fjord - a blue lung. Hentet 17/10-24 fra <https://www.grind.no/en/archaeology/fjord-blue-lung>
- Galli, G., Wakelin, S., Harle, J., Holt, J., & Artioli, Y. (2024). Multi-model comparison of trends and controls of near-bed oxygen concentration on the northwest European continental shelf under climate change. Biogeosciences, 21(8), 2143-2158.
- Golmen, L., P. Saesin, Ø. Vabø og K. Kvalsund 2024: Eksport av ferskvatn frå Tafjord. Innleiande konsekvens-analyse for marint miljø. Rapport NIVA Nr 7999, 72 s.
<https://niva.brage.unit.no/niva-xmlui/handle/11250/3164006>
- Grieger, J. (2021). Hydrographical History of 7 Fjord Basins Along the Norwegian Sognefjorden with Emphasis on Oxygen Conditions (Bachelor's thesis). <https://hvlopen.brage.unit.no/hvlopen-xmlui/handle/11250/2771971>
- Hermansen, H. O. (1974). Sognefjordens hydrografi og vannutveksling. Candidate's Science Thesis, Geophysical Ins, University of Bergen.
- Ishida, H., L. Golmen, J. West, M. Krüger, P. Coombs, J A Berge, T. Fukuhara, M. Magi og J Kita (2013): Effects of CO2 on benthic biota: An in situ benthic chamber experiment in Storfjorden (Norway). Marine Pollution Bulletin 73 (2013) 443–451.
- Johnsen, IA, V Husa, P K Hansen og Frode Vikebø (2021): Utskifting av bassengvatn i djupe terskelfjordar. Rapport fra havforskningen (HI), ISSN:1893-4536, 26 s.
- Johnsen, I A, H Loeng og M S Myksvoll (2024): Coastal alterations influence deep water renewal in Norwegian sill fjords. Estuarine, Coastal and Shelf Science 297 (2024) 108604.

- Johannessen, T., & Dahl, E. (1996). Declines in oxygen concentrations along the Norwegian Skagerrak coast, 1927-1993: A signal of ecosystem changes due to eutrophication?. *Limnology and oceanography*, 41(4), 766-778.
<https://aslopubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.4319/lo.1996.41.4.0766>
- Johnsen, I. A., Husa, V., Hansen, P. K., & Vikebø, F. B. (2021). Utskifting av bassengvatn i djupe terskelfjorðar. Rapport fra havforskningen.
- Karsakov, A. L., Trofimov, A. G., Antsiferov, M. Y., Ivshin, V. A., & Gubanishchev, M. A. (2022). 120 years of oceanographic observations along the Kola Section. Murmansk: NM Knipovich PINRO Publish. 145 pp.
- Koek, A., & van Doorn, M. (2018). Investigating environmental change in the micro-organism distribution of anoxic Ikkjefjord sediments since the 1960s, Western Norway (Bachelor's thesis, Høgskulen på Vestlandet). https://hvlopen.brage.unit.no/hvlopen-xmlui/bitstream/handle/11250/2559338/Koek_vanDoorn_.pdf?sequence=1
- Kvåle, H., Seljebotn, J. V., Holtskog, T., Helland, A., Dam, G. & Nordeide, H. C. (2023): Akvakulturanlegg i Raudbergvika og Geirangerfjorden verdsarv - konsekvensvurdering for verdsarvsområdet. Rapport V 2, 27032023, COWI, 84s.
- Lande, E. (1974). Resipientundersøkelsen av Trondheimsfjorden. Årsrapport 1972-1973.
- Lie, U., Svendsen, H., Kaartvedt, S., Mikki, S., Johnsen, T., Aksnes, D., Asvall, R. og Golmen, L. (1992): Vannkraft og fjorder: fysiske og biologiske konsekvenser av Ulla-Førre utbyggingen. Rapport UiB, 90s.
- Manzetti, S., & Stenersen, J. H. V. (2010). A critical view of the environmental condition of the Sognefjord. *Marine pollution bulletin*, 60(12), 2167-2174.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X10004352>
- Meyer, H. K., Roberts, E. M., Mienis, F., & Rapp, H. T. (2020). Drivers of megabenthic community structure in one of the world's deepest silled-fjords, Sognefjord (western Norway). *Frontiers in Marine Science*, 7, 393. <https://www.frontiersin.org/journals/marine-science/articles/10.3389/fmars.2020.00393/full>
- Olsen, J., Anderson, N. J., & Knudsen, M. F. (2012). Variability of the North Atlantic Oscillation over the past 5,200 years. *Nature Geoscience*, 5(11), 808-812.
<https://www.nature.com/articles/ngeo1589>
- Pakhomova, S., Braaten, H. F. V., Yakushev, E., & Skei, J. (2014). Biogeochemical consequences of an oxygenated intrusion into an anoxic fjord. *Geochemical transactions*, 15, 1-12.
<https://link.springer.com/article/10.1186/1467-4866-15-5>
- Paetzel, M., & Dale, T. (2010). Climate proxies for recent fjord sediments in the inner Sognefjord region, western Norway. *Geological Society, London, Special Publications*, 344(1), 271-288.
<https://www.lyellcollection.org/doi/abs/10.1144/sp344.19>
- Percival, L. M., Cohen, A. S., Davies, M. K., Dickson, A. J., Hesselbo, S. P., Jenkyns, H. C., ... & Xu, W. (2016). Osmium isotope evidence for two pulses of increased continental weathering linked to Early Jurassic volcanism and climate change. *Geology*, 44(9), 759-762.

- Runde miljøsender (2024): Forundersøking - utgreiingsbehov - verneverdiar knytt til sjø i Vestnorske Fjordlandskap – Sunnøylvs-, Geiranger- og Tafjorden. Rapport 01.06. 2024, Runde forsking, 44s.
- Staalstrøm, A. (2017) Vurdering av effekter på vannkvaliteten ved endret utslipp i Bunnefjorden og Bekkelagsbassenget. NIVA rapport 7192-2017. 36 sider.
- Staalstrøm, A. & Yakushev, E. (2019) Vurdering av mulige tiltak for å bedre vannkvaliteten i Hunnebunn. NIVA rapport 7451-2020. 85 sider.
- Staalstrøm, A. (2020) Modellering av miljøtilstanden i indre Oslofjord sett i lys av utslippstillatelser og befolkningsutvikling. NIVA rapport 7493-2020. 118 sider.
- Tvedten, Ø., Johannessen, P., Hjøhlman, S., & Botnen, H. (1994). Konsekvensvurdering i forbindelse med utfylling av steinmasser i Aurlandsfjorden. IFM-Rapport nr. 26-1994.
https://www.nb.no/items/URN:NBN:no-nb_digibok_2009073101085?page=1
- Vassenden, G., Johansen, P. O., Heggøy, E., & Johannessen, P. J. (2007). Marinbiologisk miljøundersøkelse i Aurlandsfjorden og Nærøyfjorden i 2006. Rep. No. 800744. Universitetsforskning Bergen.
- Watson, A. J. (2016). Oceans on the edge of anoxia. Science, 354(6319), 1529-1530.



Norges ledende kompetansesenter på vannmiljø

Norsk institutt for vannforskning (NIVA) er Norges viktigste miljøforskningsinstitutt for vannfaglige spørsmål, og vi arbeider innenfor et bredt spekter av miljø, klima- og ressurs spørsmål. Vår forskerkompetanse kjennetegnes av en solid faglig bredde, og spisskompetanse innen mange viktige områder. Vi kombinerer forskning, overvåkning, utredning, problemløsning og rådgivning, og arbeider på tvers av fagområder.