

Overvågning af åbne danske farvande med FerryBox-systemer

Eksempler fra Indre Danske Farvande og Nordsøen



RAPPORT

Hovedkontor

Økernveien 94
0579 Oslo
Telefon (47) 22 18 51 00

NIVA Region Sør

Jon Lilletuns vei 3
4879 Grimstad
Telefon (47) 22 18 51 00

NIVA Region Innlandet

Sandvikaveien 59
2312 Ottestad
Telefon (47) 22 18 51 00

NIVA Region Vest

Thormøhlensgate 53 D
5006 Bergen
Telefon (47) 22 18 51 00

NIVA Danmark

Njalsgade 76, 4. sal
2300 København S, Danmark
Telefon (45) 39 17 97 33

Web: www.niva.no

Titel Overvågning af åbne danske farvande med FerryBox-systemer. Eksempler fra Indre Danske Farvande og Nordsøen	Løbenummer 7761-2022	Dato 1. juli 2022
Forfatter(e) Ciarán Murray & Jesper H. Andersen – NIVA Danmark Jacob Carstensen & Hans H. Jakobsen – Institut for Ecoscience, Aarhus Universitet	Fagområde Overvågning	Distribution Åben
	Geografisk område Danmark	Sider 64

Klient Miljøstyrelsen	Kontaktperson hos klient KEGN
	Udgivet af NIVA Projektnummer 200298

Sammendrag <p>Dette projekt har haft til formål at undersøge hvordan målinger fra FerryBox kan anvendes i monitoringen af det danske havmiljø, herunder (1) hvordan målinger af klorofyl-fluorescens kan supplere <i>in situ</i>-målinger som indikator for eutrofiering samt (2) vurdere kvaliteten af andre Ferry Box-målinger som pH og CDOM-fluorescens og deres potentiel for anvendelse. Projektet har været kraftigt påvirket af corona/covid-19-situationen – ikke kun i Danmark men også i Norge og Tyskland. Færgeruten mellem Oslo og Kiel, fra hvilken en stor del af projektets data skulle indsamles, har været indstillet i store perioder. Disse huller i prøvetagning har ført til en revurdering af projektet fokus, herunder analyser af ældre data i to case study-områder: (1) langs en transekt i de åbne dele af de indre danske farvande, og (2) de åbne farvande i den danske del af Nordsøen.</p>

Fire emneord 1. Overvågning 2. Havstrategidirektive (HSD) 3. FerryBox 4. Ships-of-opportunity	Four keywords 1. Monitoring 2. Marine Strategy Framework Directive (MSFD) 3. FerryBox 4. Ships-of-opportunity
--	--

Denne rapport er kvalitetssikret iht. NIVAs kvalitetssystem og godkendt af:

Ciaran J. Murray
Projektleder

Kvalitetssikret af

Nikolai Friberg
Forskningschef

ISBN 978-82-577-7497-4
NIVA-rapport ISSN 1894-7948

© Norsk institutt for vannforskning. Publikationen kan citeres frit med kildeangivelse.

MST FB4-projekt

**Overvågning af åbne danske farvande
med FerryBox-systemer**

Eksempler fra Indre Danske Farvande
og Nordsøen

Forord

Denne rapport er et resultat af MST FB D5-projektet, igangsat og finansieret af Miljøstyrelsen som en del af styrelsens arbejde med optimering af overvågningen af de åbne danske farvande i regi af EU's Havstrategidirektiv.

Projektet er gennemført af NIVA Danmark og Institut for Ecoscience ved Aarhus Universitet.

Fremdriften, eller snarere manglen på sammen, har været fulgt og drøftet i en følgegruppe bestående af medarbejdere fra NIVA Danmark, Aarhus Universitet og Miljøstyrelsen. Medlemmerne har være: Kristian Ege Nielsen (Miljøstyrelsen), Mikael Hjort Jensen (Miljøstyrelsen), Jacob Carstensen (Aarhus Universitet), Hans H. Jakobsen (Aarhus Universitet), Jesper H. Andersen (NIVA Danmark) og Ciarán Murray (NIVA Danmark).

Forløbet at projektet har desværre været påvirket af corona/covid-19-situationen – ikke kun i Danmark, men også i Norge og Tyskland. Færgeruten mellem Oslo og Kiel, fra hvilken en stor del af projektets data skulle indsamles, har været indstillet i store perioder. I dialog med følgegruppen har disse huller i prøvetagningen har ført til en revurdering af projektet fokus, herunder analyser af ældre data i to case study-områder:

- (1) langs en transekt i de åbne dele af de indre danske farvande, og
- (2) de åbne farvande i den danske del af Nordsøen.

København, 1. juli 2022

Ciarán Murray
Projektleder

Taksigelser

En særlig tak til Miljøstyrelsen, specielt Kristian Ege Nielsen og Mikael Hjorth Jensen. Tak til Dr. Yoana Voynova og Dr. Wilhelm Petersen, Helmholtz Zentrum Hereon (HZH), Institut für Kohlenstoff-Kreisläufe for hjælp med adgang til data fra Nordsøen og for at svare på mange spørgsmål. Også tak til Pierre Francois Jaccard, Andrew Luke King, Sabine Marty, Elizaveta Protsenko og Kai Sørensen fra NIVAs FerryBox-hold i Norge.

Indholdsfortegnelse

1	Introduktion	6
1.1	Overordnede formål	7
1.2	Hvad er en FerryBox?.....	7
1.3	Review af brugen af FerryBox-systemer i forbindelse med overvågning af havmiljøet	10
1.3.1	Styrker og udfordringer	10
1.3.2	Anvendelse og perspektiver	12
2	FerryBox-overvågning langs et nord/sydgående transekt i Indre Danske Farvande	14
2.1	Datagrundlag	14
2.2	Valideringsanalyser og potentielle dataprodukter	18
2.2.1	Overensstemmelse mellem ekstraheret klorofyl og FerryBox data.....	19
2.2.2	Lysforholds påvirkning af målt fluorescens	19
2.2.3	Påvirkning af organisk materiale på målt fluorescens	21
2.2.4	Anvendelse af FerryBox-målinger	23
3	FerryBox-overvågning i de åbne danske dele af Nordsøen	25
3.1	Datagrundlag	25
3.2	Validering	27
3.2.1	Kombinering af FerryBox- og valideringsdata	27
3.2.2	Validering af salinitet, temperatur og ilt	29
3.2.3	Validering og analyse af klorofyl	31
3.2.4	Validering og analyse af pCO ₂ og pH	33
3.2.5	Transekter.....	36
4	Overførsel af dataprodukter	37
5	Konklusioner	38
6	Referencer	40

Sammenfatning

Det overordnede mål for dette projekt var at undersøge hvordan målinger fra et autonomt målesystem kaldet "FerryBox", monteret på et skib i fast rute, kan anvendes i overvågningen af havmiljøet, herunder hvordan målinger af klorofyl-fluorescens kan supplere *in situ*-målinger som indikator for eutrofiering, samt vurdere kvaliteten af andre Ferry Box-målinger som pH og CDOM-fluorescens og deres potentielle for anvendelse.

Hovedresultaterne af arbejdet er:

- Der er samlet tilgængelige data fra FerryBox i det danske havområde over perioden 2007-2021. Efter analyse er disse blevet overført til Miljøstyrelsen.
- En review af litteratur relaterede til anvendelse af Ferry Box-målinger er udført.
- Målinger af klorofyl-fluorescens er sammenlignet med målte klorofyl koncentrationer. Der er demonstreret hvordan CDOM-fluorescens, og i mindre grad baggrundslysintensitet, kan påvirke målinger af klorofyl-fluorescens og hvordan målinger af disse parametre kan bruges til korrigere for deres påvirkninger på klorofyl fluorescens og dermed øge kvaliteten af Ferry-Box-produkter.
- I Nordsøen var resultaterne mindre tilfredsstillende. Udover at relationen mellem klorofyl-fluorescens og klorofyl var svagt, var overlap mellem FerryBox-målinger og *in situ*-målinger ikke tilstrækkelig til, at de kunne bruges til forbedre resultaterne.
- På Oslo-Kiel-ruten var det derimod muligt med de opstillede modeller at opnå en prædiction af klorofyl a indenfor $\pm 2 \mu\text{g/L}$ med 95% konfidens.
- Desværre viser det sig også at målinger af andre parametre såsom pCO_2 og pH ikke har en tilstrækkelig kvalitet på nuværende tidspunkt, hvorfor målingerne ikke umiddelbart er anvendelige i en overvågningsammenhæng.

Konklusioner fra projektet er:

- Resultaterne viser hvor vigtigt det er at FerryBox-instrumenter løbende bliver kalibreret og målinger bliver kvalitetssikret for at undgå drift eller andre fejlkilder. Det er svært at øge kvaliteten af data efter det er indsamlet.
- Målinger af klorofyl-fluorescens fra Oslo-Kiel-ruten har en tilstrækkelig kvalitet til at de kunne anvendes i en overvågningsammenhæng – under forudsætning af at alle anbefalinger om kvalitetssikring og vedligehold af måleinstrumenter overholdes.

Summary

Title: Monitoring of open Danish marine waters with FerryBox systems: Examples from the North Sea and Inner Danish Waters

Year: 2022

Author(s): Ciarán Murray, Jesper H. Andersen, Jacob Carstensen & Hans H. Jakobsen

Source: Norwegian Institute for Water Research, ISBN 978-82-577-7497-4

The aim of this project was to investigate how measurements from an autonomous measurement system “FerryBox” measurements can be used in monitoring of the Danish marine environment. This includes examining how chlorophyll fluorescence can supplement *in situ* measurements as an indicator of eutrophication as well as judging the quality of other FerryBox data, such as pH and CDOM fluorescence and their potential for use.

The main results are

- Available data from FerryBoxes in the Danish seas over the period from 2007 to 2021 have been collected. After analysis, they have been delivered to the Danish Environmental Protection Agency (Miljøstyrelsen)
- A literature review on the application of FerryBox measurements has been produced.
- Chlorophyll fluorescence measurements were compared with measured chlorophyll concentrations. We have demonstrated how CDOM and, to a lesser extent, background light intensity can influence chlorophyll fluorescence and how measurements of these parameters can be used to correct for these effects, thereby increasing the quality of FerryBox products.
- Results from the North Sea were less satisfactory. The relationship between fluorescence and chlorophyll was weak. In addition, there was not sufficient overlap between FerryBox and *in situ* measurements such that these could be used to improve the results.
- On the other hand, it was possible to establish models for data from the Oslo-Kiel route, allowing prediction of chlorophyll a within $\pm 2 \mu\text{g/L}$ with 95% confidence.
- Unfortunately, measurements of other parameters such as pCO_2 and pH are not, at the present time, of sufficient quality that they can be useful in a monitoring context.

Conclusions from the project are:

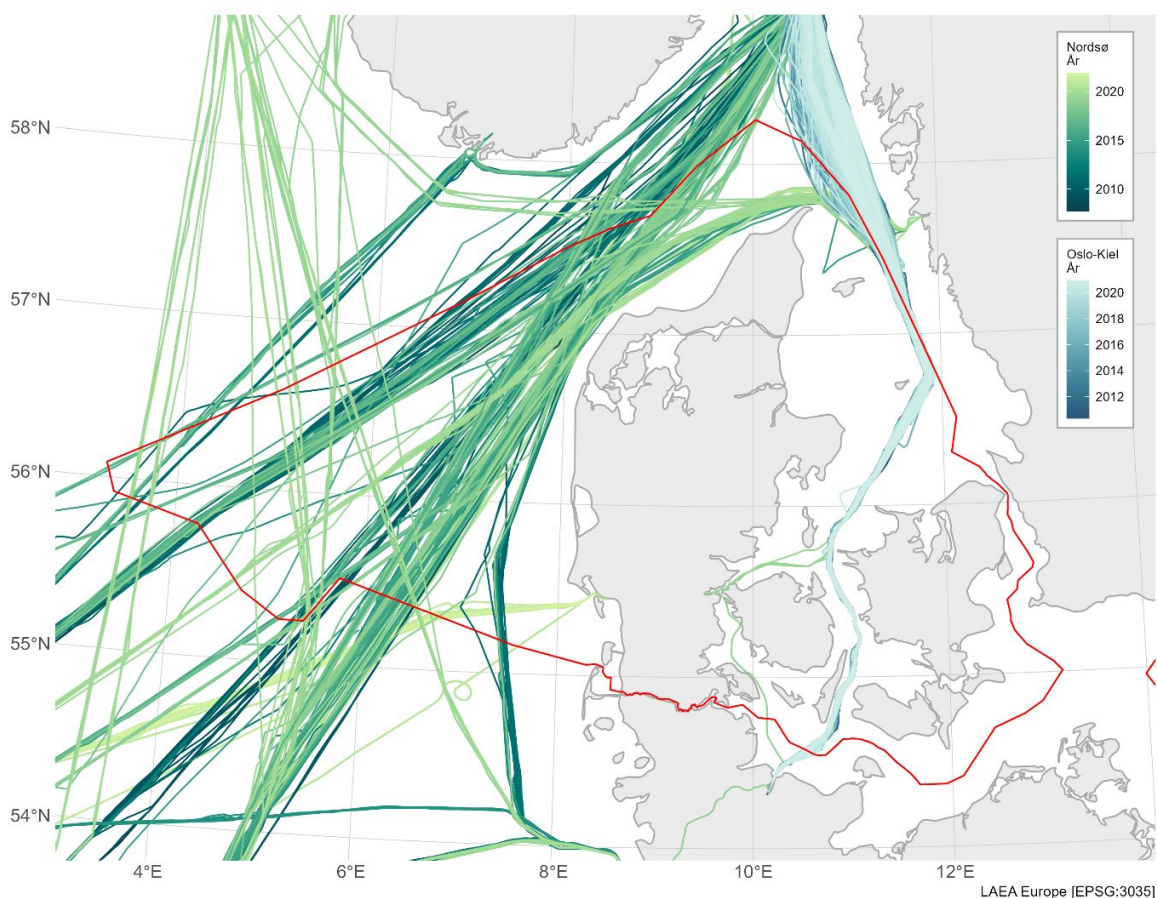
- The results highlight the importance of continuous calibration of FerryBox instruments and quality control of measurements, in order to avoid drift or other sources of error. It is difficult to improve the quality of data after it has been collected.
- The chlorophyll fluorescence measurements from the Oslo-Kiel route have sufficient quality to be useful, assuming that recommendations for quality control and maintenance of instrument are followed.

1 Introduktion

Denne rapport er en sammenfatning af resultaterne fra projektet MST FB D5-projektet. Set i bagklogskabens lys er der ikke tale om en specielt informativ projekttitel medmindre man er ekspert i overvågning og/eller EU's Havstrategidirektiv. Baggrunden for den lidt kryptiske projekttitel er følgende:

- Miljøstyrelsen ('MST') har igangsat og finansieret projektet for at få etableret et bedre fagligt grundlag for at træffe beslutninger om tilrettelæggelsen af den fremtidige overvågning af de åbne danske farvande i henhold til Havstrategidirektivet.
- Projektet er baseret på data fra FerryBox (forkortet 'FB'), som er et målesystem installeret på en færge, hvor overfladevand fra et indtag i stævnen analyseres for en række parametre.
- Resultaterne skal understøtte en tilstandsvurdering for Havstrategidirektivets 'Deskriptor 5' eller 'D5', som er en ud af Havstrategidirektivets i alt 11 deskriptorer for vurdering af miljøtilstanden i de åbne farvande. D5 har et specifikt fokus på eutrofiering.

På mere jævnt dansk omhandler projektet overvågning af eutrofieringsrelaterede parametre med automatisk prøvetagningsudstyr monteret på skibe, som sejler i fast rutefart igennem de åbne danske farvande. Disse FB-systemer findes allerede installeret på en række skibsruter og nærværende projekt vil analysere data fra disse.



Figur 1: Ruter igennem Nordsøen og indre danske farvande. Farven indikerer hvilket år der er sejlet.

1.1 Overordnede formål

Det overordnede formål med MST FB D5-projektet har været:

- At undersøge og overvåge eutrofiering (klorofyl-koncentrationer) og evaluere potentialet for målinger af forsurening (pH) og partialtryk af CO₂ i overfladevandet på to transekter gennem de danske farvande – et nord/syd-transekt (Oslo-Kiel) gennem de indre danske farvande og et øst/vest-transekt (Gøteborg-Immingham), som dækker de åbne dele af Kattegat, Skagerrak og Nordsøen.

MST FB D5-projektet har desuden haft følgende del-mål:

- At analysere fluorescensbaserede klorofylldata og efterfølgende korrigere disse, så de er sammenlignelige med *in situ*-målte klorofylkoncentrationer (videreudvikling af tidligere FerryBox-projekter; se Andersen *et al.* 2017).
- At udarbejde forslag til hvordan klorofyl- og forsøringsdata kan aggregeres på tidsmæssigt og geografisk niveau.
- At analysere pH- og CDOM-fluorescens data og undersøge den potentielle anvendelighed af disse i forhold til vurderinger af klimaændringer og forsurening, herunder inddragelse af historiske data.
- At udarbejde et litteratur-review om anvendelsen af FerryBoxe på skibe i fast rutedrift til overvågningsformål, herunder praktiske perspektiver mht. analyser af næringsalte og plankton (arts-sammensætning og biomasse).
- At fastlægge formater for overførsel af data til Miljøstyrelsen samt overføre kvalitetssikrede data indsamlet i 2020 og 2021.
- At udarbejdet overordnede anbefalinger til brug af FerryBox-målinger i HSD-overvågningsprogrammet inklusive forslag vedr. kalibrering og løbende kvalitetskontrol af forskellige metoder for at sikre kontinuiteten af tidsserier.

Denne rapport besvarer derfor følgende spørgsmål:

1. Had er formålet med MST FB D5-projektet?
2. Hvad er en FerryBox?
3. Hvad kan vi bruge målinger fra en regelmæssigt besejlet transekt til og hvad har vi lært?
4. Kan vi kombinere målinger fra flere ruter i den danske del af Nordsøen, som ikke bliver besejlet så ofte?
5. Hvordan kan og bør data overføres til Miljøstyrelsen?
6. Hvad kan vi konkludere – og hvad kan vi anbefale fremadrettet?

Spørgsmål 1 er besvaret ovenfor. Spørgsmål 2 er besvaret i det følgende afsnit. Spørgsmål 3 er besvaret i kapitel 2, mens spørgsmål 4 er besvaret i kapitel 3. Spørgsmål 5 er besvaret i kapitel 4. Endelig er spørgsmålene om konklusioner og anbefalinger fremadrettet besvaret i kapitel 5.

1.2 Hvad er en FerryBox?

En FerryBox er et system af målesensorer koblet til en computer, som måler en række parametre på vandindtag fra overfladen og logger position og klokkeslæt, mens skibet sejler i en fast rute. For transekten mellem Oslo og Kiel sendes disse data via mobildataforbindelse til NIVA. Dette giver real-time adgang til rådata, som endnu ikke har undergået en mere detaljeret kvalitetssikring.

Denne rapport beskriver og behandler data indsamlet med en FerryBox monteret i maskinrummet på skibet MS Color Fantasy, som sejler i fast rute mellem Oslo (Norge) og Kiel (Tyskland), samt data indsamlet med FerryBox på fragtskibe der sejler i Nordsøen på varierende ruter.



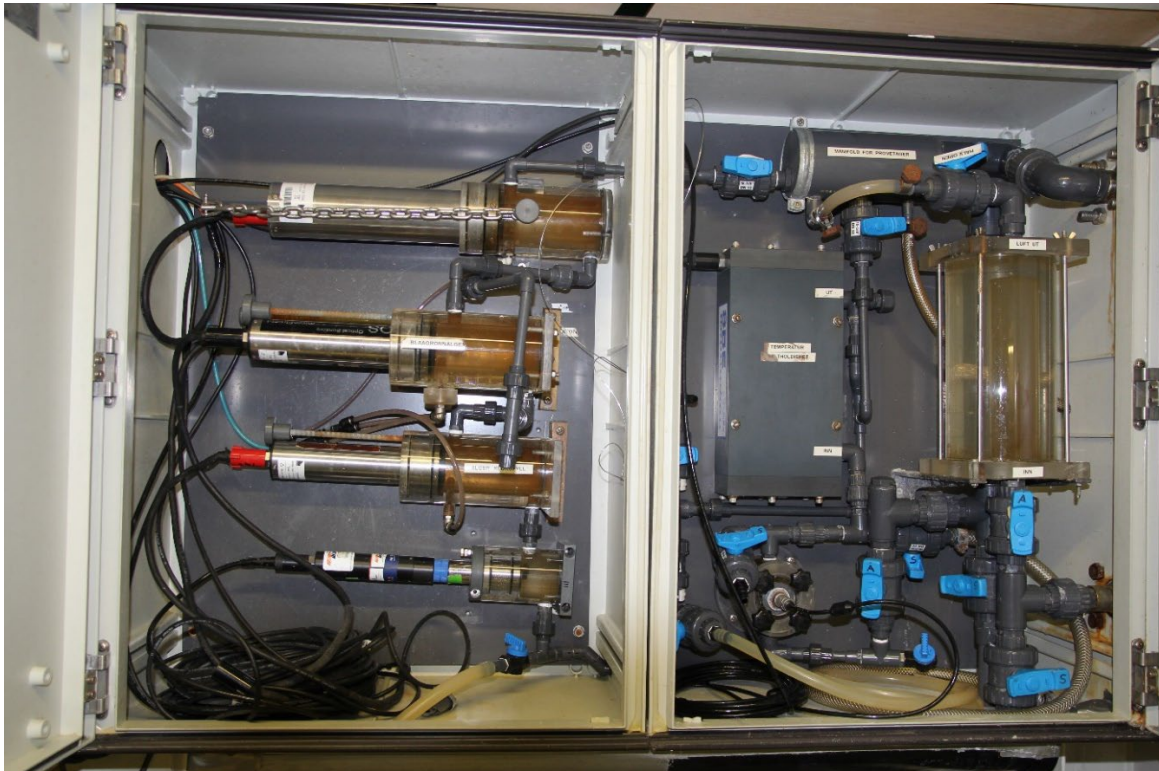
Figur 2: MS Color Fantasy (Color Line). Foto: NIVA.

FerryBoxen har et vandindtag i skroget på omtrent 4 meters dybde hvor vand suges ind ved hjælp af en peristaltisk pumpe og føres til et teknik-rum på skibet, hvor en rækkes sensorer er placeret. Som minimum er der sensorer der måler temperatur og salinitet men typisk også klorofyl fluorescens, turbiditet og iltkoncentration. De specifikke parametre målt af FerryBoxen på Color Fantasy og på skibe der opererer i Nordsøen beskrives i henholdsvis kapitel 2 og kapitel 3.

Yderligere oplysninger om FerryBoxen på MS Color Line og tidligere undersøgelser i de danske farvande kan findes i:

- Andersen, J.H., T. Harvey, E. Kallenbach, C. Murray, Dag. Hjermann, T. Kristiansen, K. Sørensen, J. Carstensen, A. Erichsen & L.B. Hansen (2017): Statistical analyses of chlorophyll-a data sampled from the FerryBox on the Oslo-Kiel ferry and the NOVANA programme. NIVA Denmark Report, sider, 30 sider. <https://niva.brage.unit.no/niva-xmlui/handle/11250/2480242>
- Bavel, B., Lusher, A., P.F. Jaccard, S. Pakhomova, C. Singdahl-Larsen, J.H. Andersen & C. Murray (2020): Monitoring of microplastics in Danish marine waters using the Oslo-Kiel ferry as a ship-of-opportunity. NIVA Denmark report, 34 sider. <https://niva.brage.unit.no/niva-xmlui/handle/11250/2678966?locale-attribute=en>

- Lusher, A., C. Singdahl-Larsen, P.F. Jaccard, B. van Bavel, L. Valestrand, E.T. Harvey & J.H. Andersen (2021): Frequent sampling of microplastic particles in surface waters in the open parts of the Kattegat and Great Belt, Denmark. NIVA Denmark report, 23 sider.
<https://niva.brage.unit.no/niva-xmlui/bitstream/handle/11250/2735983/7601-2021+high.pdf?sequence=2>
- Sørensen, K., W. Eichrem, L. Valestrand, T. Kristiansen & M. Norli (2020): Årsovervågning med FerryBox – Indre Oslofjord 2019 – Datarapport. Rapport fra NIVA, 16 sider + bilag.
<https://niva.brage.unit.no/niva-xmlui/handle/11250/2654920>



Figur 3: FerryBox'en i maskinrummet på MS Color Line. Foto: NIVA.

Desuden kan en gennemgang af anvendeligheden af FerryBox i overvågningen, udarbejde i regi af indeværende projekt, findes i Bilag 1.

1.3 Review af brugen af FerryBox-systemer i forbindelse med overvågning af havmiljøet

Dette afsnit er et sammendrag af et review omhandlende erfaringer med brugen af FerryBox-systemer i forbindelse med overvågning miljøforhold i åbne farvande (se Jakobsen *et al.* 2022, bilag 1 i denne rapport).

Fokus i reviewet har været på at beskrive den aktuelle og mulige fremtidige brug af FB-data i overvågningsammenhæng samt inkludere forskningsstudier, hvor metoderne kunne tænkes at føde ind i overvågningsprogrammer. Dette inkluderer eksempler på supplerende analyser (fx næringsstoffer, mikroplastik, anvendelse af flow cytometri, etc.) og kompositprodukter (fx kort baseret på informationer fra flere kilder/overvågningstyper) i danske farvande, og farvandene omkring Danmark.

De senest 20 år er der sket en løbende udvikling i FB-teknologien, der i begyndelsen var simple systemer, som alene målte temperatur, salinitet og fluorescens som proxy for klorofyl. De nuværende systemer tilbyder desuden en lang række andre målinger af forskellig karakter, der tilsammen kan samles i et velunderbygget billede af de biologiske og oceanografiske forhold i havoverfladen.

Der kan være flere grunde til at implementere FB i forbindelse med overvågning af havmiljøet. Det kan være et ønske om at følge og beskrive havmiljøets tilstand og behov for at dokumentere effekten af initiativer iværksat for at reducere udvalgte presfaktorer, fx udledninger af næringsstoffer. FB-systemer kan derfor være nyttige i forhold til at understøtte flere af havstrategidirektivets deskriptorer, eksempelvis D4 "Food Webs", D5 "Eutrophication", D7 "Hydrographical conditions" og D10 "Marine litter". Nogle eksempler på data er klorofylmålinger og indsamling af plastik i havoverflade. Kravene til data er angivet i EU's GES-beslutning, og ved en eventuel implementeringen af FB-systemer i overvågningen er det vigtigt at have fokus på EU's GES-beslutning (EU 2017). Dertil kan det være nyttigt at følge og forstå effekten af klimaændringer på havmiljøet over længere skalaer i tid og rum. Det kan i praksis være vanskeligt at adskille klimaeffekter og menneskeskabte påvirkninger, men ændringer forårsaget direkte af menneskelig aktivitet vil formodentligt vise sig på en kortere tidsskala end klimaeffekter.

1.3.1 Styrker og udfordringer

Rumlig opløsning: Målingerne foretages langs skibets rute, og data har langt større horisontal dækning af overfladevandet sammenlignet med de enkeltmålinger, som kendes fra det danske NOVANA-program. Ulempen ved FB-data er, at data kun indsamles i overfladen, langs en transekt. Omvendt vil gentagne besøg på samme position mindst én gang dagligt give et højopløseligt billede af transektet. Derudover indeholder data ikke information om de dybere vandlag. Det betyder fx at klorofyl maksimum i springlaget, som karakteriserer hovedparten af Nordsøen og store dele af Kattegat (Richardson *et al.* 2000), ikke måles. Derfor kan der ikke beregnes integrerede koncentrationer, som repræsenterer hele vandsøjlen.

Tidslig opløsning: Den tidsmæssige opløsning af et FB-transekt er typisk dag til uge, afhængig af sejlplan. FB kan derfor bruges til overvågning af dynamiske havområder, hvor forholdene ændrer sig hurtigt. Ved indsamling af FB-data over længere tid kan disse data benyttes til at få en bedre forståelse af fx successioner og udviklingstrends i planktonsamfundet. De havområder, hvor der i dag findes FB-data, er dog knap så dynamiske som fx kystområder og fjorde.

Inden anvendelse af FB implementeres, er det vigtigt at forstå, at indsamlingen ikke er det primære formål med skibenes fragtruter, og fragtlinjer oprettes, ændres eller flyttes til andre havområder

med risiko for at forstyrre integriteten af de indsamlede data. Der er derfor en risiko for, at tidsserier til en vis grad kan blive afbrudt, men dette kan kompenseres ved at anvende flere skibe, der besejler de samme områder.

Det giver ikke mening at diskutere de enkelte sensorers (parametre) *modus operandi* i detaljer eller specifikke sensorprodukter, da der sker en løbende teknologisk udvikling og forfinelse af sensorerne, der er tilgængelige på markedet. Eksempelvis er SCUFA-klorofylsensoren fra Turner Designs, som tidligere anvendtes på en del af NIVAs FB, udgået af produktion. Det betyder ikke, at data ikke kan anvendes, men at de nyere sensorer leverer mere robuste og præcise data.

Reviewet giver en kort indføring i sensorernes funktioner, som er nødvendig at kende for at fortolke data. FB-parametrene kan groft opdeles i to typer, nemlig 1) sensorer, der giver information om fysiske og kemiske forhold, og 2) sensorer, der giver informationer om (afledte) biologiske forhold. Begrebet afledte målinger dækker i denne sammenhæng dataprodukter, der beskriver biologisk aktivitet. Sensorfunktionerne vedrører følgende forhold: 1) Temperatur og salinitet, 2) Turbiditet, 3) pCO₂ og O₂, 4) pH og 5) Fluorescens.

Som supplement til de kontinuerte målinger med sensorer kan der indsamles prøver med forholdsvis høj rumlig opløsning langs FB-ruten. Der kan f.eks. indsamles diskrete prøver langs med transektet, der muliggør bestemmelser af næringssalte (Lips *et al.* 2014). Samme fremgangsmåde kunne implementeres til indsamling af prøver til undersøgelser af planktonsamfundet under mikroskop og som reference for eksempelvis til kalibrering af sensorer. I en anden undersøgelse er der udviklet en metode til indsamling af større volumener filtreret over fintmaskede net, hvilket har gjort det muligt at kortlægge koncentrationer af mikroplastik med FB (Bavel *et al.* 2020).

I forhold til datakvalitet / kvalitetssikring har EuroGOOS etableret en arbejdsgruppe, der fungerer som platform for udveksling af viden inden for FB. Arbejdsgruppe har bl.a. udarbejdet en oversigt over nuværende teknologiers formåen, og standardsensorerne for salinitet, temperatur og O₂ angives som operationelle og anvendelige uden yderligere udvikling. De øvrige sensorer, der er behandlet i denne oversigt, beskrives som delvist operationelle, men med behov for "major improvements" (EuroGOOS 2021).

I forhold til at forhindre 'drift' i sensorerne er løbende kalibrering og validering afgørende for at sikre pålidelige data. Diskrete vandprøver kan indsamles vha. automatisk prøveindsamlere, som gemmer en vandprøve til efterfølgende analyse i laboratoriet, og eventuelt kalibrering af sensorer. Alternativt kalibreres sensorernes parametre periodisk ved havneanløb efter intervaller afstemt for hver sensortype. Det er vigtigt, at der løbende føres logbog over kalibreringen samt eventuelle afvigelser, der er opstået som følge af drift i sensorerne mellem kalibreringen, for efterfølgende at kunne korrigere målingerne. Det betyder, at når sensorer udskiftes som følge af nedbrud eller erstattes af nye og mere moderne sensortyper, at det skal sikres, at der sker en omhyggelig udfasning og indkøring, fx ved løbende parallelle målinger sammenholdt med kalibreringsdata. Derved skal det sikres, at data fra sensorerne er sammenlignelige, og at en konsistent tidsserie kan bevares.

I en undersøgelse, hvor stabiliteten af standardparametrene salinitet og temperatur blev undersøgt, var 50 % af data typisk til rådighed i forhold til den planlagte FB-indsamling. Fravær af sejlads og fejl på sensoren blev angivet som årsagerne. Nyere studier rapporterer om langt mindre tab af data på omkring 9 % (Marrec *et al.* 2014), og dette kan skyldes, at forbedret erfaringsgrundlag og modning af teknologier har spillet en væsentlig rolle. For andre sensorer er driftssikkerheden ikke opgjort, men det antages, at driftsstabiliteten er stigende med teknologiens modenhed og alder.

1.3.2 Anvendelse og perspektiver

Styrken ved FB er ikke nødvendigvis målingerne fra de enkelte separate sensorer, men snarere anvendelsen af FB-integrerede dataprodukter, hvor flere datatyper samles i et aggregeret produkt. Værdien af FB øges derfor betydelig, hvis FB kan kombineres med andre data. I en undersøgelse fra Den Finske Bugt blev FB anvendt sammen med data fra bøjestationer og satellitter. Derved kunne forskerne undersøge de fysiske oceanografiske processer i meget høj opløsning i tid og rum, og dermed demonstrere, hvordan vandmasser opblandes vertikalt (Lips *et al.* 2016).

Kombinationen af FB, data fra satellitter og prøvetagning fra undersøgelseskib kan bruges til at opdage og overvåge fytoplanktonopblomstringer i tid og rum. Fluorescens, omregnet til klorofyl, og turbiditet fra FB og tilsvarende satellitprodukter blev fx sammenholdt med artsbestemmelser fra diskrete prøvetagninger, og derved kunne der opnås en detaljeret forståelse af nøglearten *Emiliana huxleyi* i Nordatlanten/norske fjorde (Volent *et al.* 2011).

I et andet studie kombineres FB med data fra satellitter i et område i Østersøen. I den centrale del af Østersøen er årligt tilbagevendende opblomstringer af blågrønalger et stort problem. Blågrønalgerne samler sig i overfladen om sommeren og giver anledning til ekstremt høje klorofylværdier fra satellitterne. I undersøgelsen kunne klorofyl fra FB anvendes sammen med satellitdata til at frasortere (kvalitetssikre) ekstreme værdier, der forstyrrede satellitbestemt klorofyl (Groetsch *et al.* 2014)

I et tredje eksempel på brug af integrerede data kunne FB kombineret med flowcytometri i et forskningsprojekt forklare anomalier i satellitters reflektans som funktion af cellestørrelser og algeopblomstringer (Thyssen *et al.* 2015).

Der er andre studier, som peger på anvendeligheden af FB til at identificere lokale havområder af særlig betydning i forhold til den biologiske pumpe (Petersen *et al.* 2011, Schneider *et al.* 2014) eller områder, der har en særlig funktion, fx havområder påvirket af vinddrevene upwellings (Kikas & Lips 2016).

I en undersøgelse af CO₂-målinger over flere sæsoner konkluderede Schneider *et al.* (2014), at den biologiske pumpe i den centrale del af Østersøen overordnet fjernede CO₂ fra vandsøjlen og begravede det som organisk kulstof i sedimentet (netto-optag).

1.3.2.1 Next steps

Hvis det på et tidspunkt besluttes at implementere FB i en eller anden form til at understøtte overvågningen af miljøforholdene i de åbne dele af de danske farvande, er det vigtigt at acceptere, at periodevise målinger er utilstrækkelige til at give et samlet billede af områdets miljøtilstand. Det kræver kontinuerte data, der tilsammen kan danne en længere tidsserie. Det fælleseuropæiske EuroGOOS FerryBox-projekt angiver, hvilke transekter der er aktive, og hvorfra der kan indhentes data (https://ferrydata.hzg.de/index.cgi?seite=passage_plot_plotly). Heraf fremgår det, at der for nuværende (primo 2022) er en enkelt aktiv transekt i Nordsøen, der går fra Esbjerg til Immingham. Det kan være en udfordring at sikre kontinuerte data for et givent havområde som fx Nordsøen, og for at sikre anvendeligheden bør de kompetente myndigheder sikre, at driften af FB-systemet fastholdes over en længere årrække for at indsamle tilstrækkelige mængder data til, at de kan bidrage med information om udviklingen i havets miljøtilstand.

Hvis man ønsker at anvende resultater indsamlet med FB i en overvågnings- eller forvaltningssammenhæng, er det vigtigt, at der er international enighed mellem landene. Dette kan være en udfor-

dring, da FB tager prøver i skibets stævnør (≈ 5 m). EU's GES-beslutning (EU 2017) angiver fx, at klorofyl (D5C2) skal indsamles integreret for hele vandsøjlen, samt at mikroplastik (D10C2) skal indsamles i havoverfladen. Det kan have den konsekvens, at data, der ikke opfylder kravene i GES-beslutningen, risikerer at blive "flaget" (eller i visse tilfælde afvist) i de miljøtilstandsvurderinger, som fx HELCOM (HOLAS III), OSPAR (QSR23) og EEA (Marine Messages III) udarbejder. Det er derfor afgørende, at en myndighed, der beslutter sig for at anvende FB, sikrer sig, at data kan anvendes i fremtidige indberetninger og vurderinger af miljøtilstanden. I andre tilfælde er udviklingen af indikatorer inden for EU's havstrategi (MSFD) stadig så umodne, at det kan være attraktivt at undersøge anvendelsen af FB-data i udviklingsarbejdet af indikatorer med tilhørende operationelle GES-værdier.

Dertil skal der afsættes løbende ressourcer til bearbejdning af data, hvilket bør medtages i budgetterne, da der kan være større omkostninger forbundet med kvalitetssikring af FB-data i forsknings- og forvaltningsprojekter foruden udvikling af algoritmer til at omsætte disse højfrekvente data til relevant information i overvågnings- eller forvaltningssammenhæng. FB producerer meget store datamængder, og den løbende udskiftning og opgradering af sensorer rummer en risiko for, at datamængden og manglende konsistens i tidsserier vokser til et omfang, der kan være vanskeligt at håndtere. For at minimere risikoen for, at et FB-projekt lider "datadøden", er det afgørende, at de nødvendige ressourcer afsættes til kvalitetssikring, kalibrering, oparbejdning, kompilering og anvendelse af data.

2 FerryBox-overvågning langs et nord/sydgående transekt i Indre Danske Farvande

Hovedformålet med analysen af data fra FerryBox-transektet i de indre danske farvande er at undersøge, om FerryBox målinger af klorofyl-fluorescens kan supplere de eksisterende målinger fra NOVANA-overvågningen med hyppigere tidsserier og bedre rumlig repræsentation af mængden af klorofyl a i overfladen. For at vurdere dette er det vigtigt at undersøge følgende:

1. Er der overensstemmelse mellem målinger af ekstraheret klorofyl fra overvågningsdata og klorofyl fluorescens fra FerryBox?
2. Er målingen af klorofyl-fluorescens afhængig af planktonets lystilpasning?
3. Er der andre faktorer, som kan påvirke målingen af klorofyl-fluorescens i forhold til ekstraheret klorofyl?
4. Hvor stor sikkerhed er der i bestemmelsen af klorofyl a ud fra FerryBox-målingerne?

Disse spørgsmål vil blive besvaret efter en gennemgang af det specifikke område og de indsamlede data.

2.1 Datagrundlag

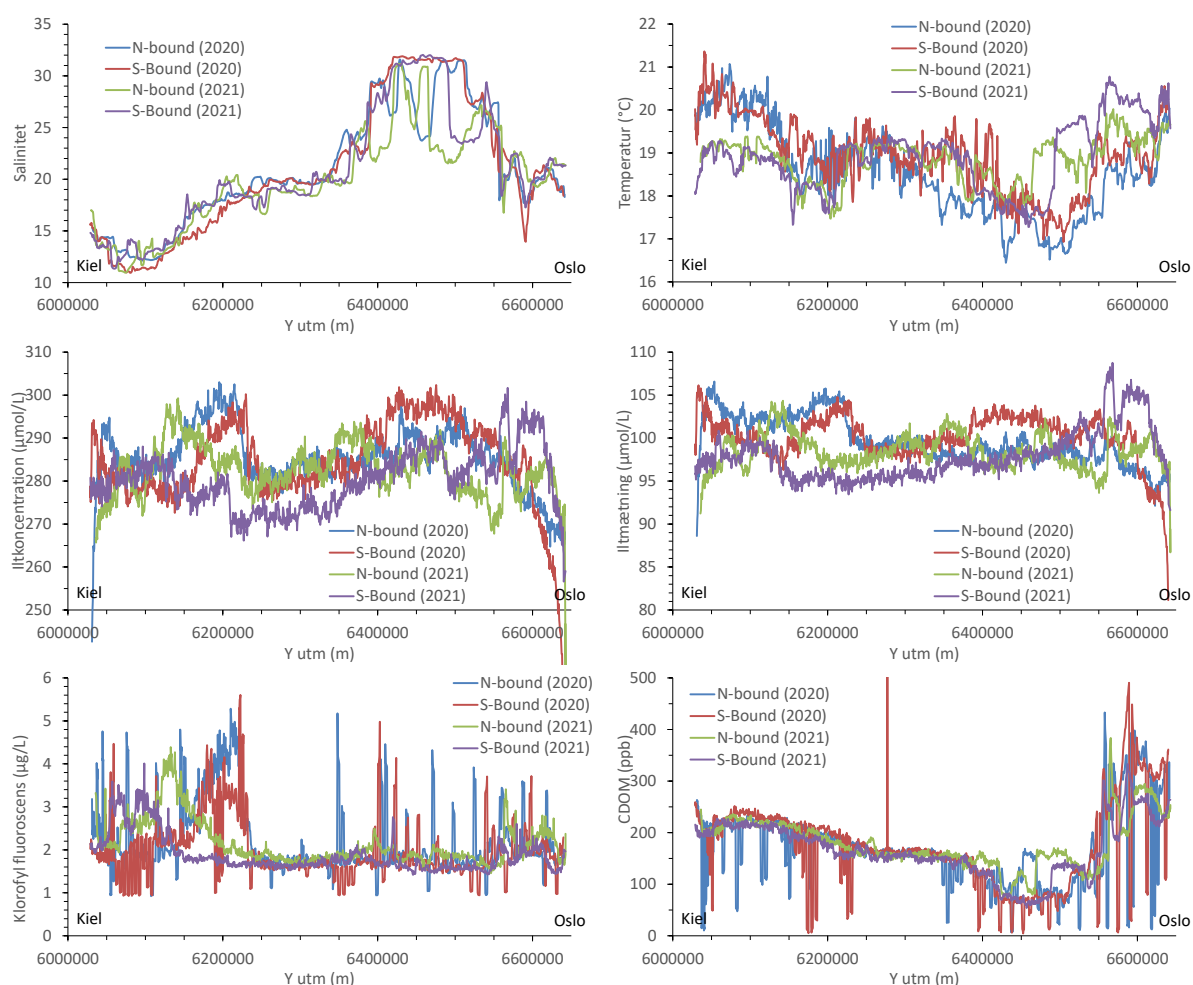
FerryBox-data fra Oslo-Kiel ruten (Color Line) i perioden januar 2019 til august 2021 er anvendt i dette studie, og sammenholdt med overvågningsdata fra NOVANA, SMHI og NIVA. FerryBox-data er leveret i to datasæt (et for 2019 og et for 2020-2021) af NIVA i Oslo og består af en række parametre, som varierer mellem de to data filer (**Table 1**). I 2020 er der tilføjet en RBR-sensor for måling af ilt og en Turner C3-sensor for måling af turbiditet, klorofyl og CDOM. Derimod er Trios microFlu-sensoren for måling af klorofyl og CDOM og Sensors-Inc for måling af pCO₂ kun anvendt i 2019. Derudover findes der i datafilen fra 2020-2021 et kalibreret signal for klorofyl, men kalibreringen er baseret på relativt få data fra Oslofjorden, som ikke nødvendigvis er repræsentative for resten af transekten. Derfor betragtes kun det målte klorofyl-fluorescenssignal.

Table 1: Oversigt over anvendte FerryBox-sensorer på Oslo-Kiel ruten i 2019-2021. Der er ikke anvendt pCO₂-sensor i 2020-2021 og iltkoncentration er ikke med i datafilen for 2019. I 2020-2021 har der været anvendt duplikate sensorer for flere parametre.

Parameter	Enhed	2019	2020-2021
Temperatur	°C	Seabird SBE38	Seabird SBE38
Salinitet	PSU	Seabird SBE45	Seabird SBE45
Iltkoncentration	µmol/L		Aanderaa4835/RBR
Iltmætning	%	Aanderaa4835	Aanderaa4835/RBR
Turbiditet	FTU	AML MicroX	AML MicroX/Turner C3
Klorofyl a (fluorescens)	µg/L	Trios microFlu	Turner C3
CDOM	ppb	Trios microFlu	Turner C3
pCO ₂	ppm	Sensors-Inc	

FerryBox-målingerne har ikke kørt kontinuert over hele perioden, idet der er nogle længere tidsmæssige udfald i specielt 2020 og 2021. I 2019 er der kontinuerte tidsserier fra 22. januar til 31. december med målinger næsten hver eller hver anden dag (256 dage i alt). I 2020 er der målinger i en kort peri-

ode i marts, en lidt længere periode fra juni til starten af september, og en kort periode fra slutningen af oktober til starten af november. I 2021 er der kun FerryBox-data fra slutningen af juni til midt i august. I alt er der FerryBox målinger for 332 dage i 2019, 94 dage i 2020 og 56 dage i 2021 (frem til august). De færre dage med målinger i 2020 og 2021 skyldes hovedsageligt færre afgangene i Color Line på grund af corona. Inden FerryBox-data kan anvendes, har det været nødvendigt kritisk at gennemgå de store datamængder og filtrere i data, således at 1) forkert angivne positioner i datafiler er rettet, 2) spikes i data er fjernet og 3) markante skift i niveau er slettet. Kvalitetssikringen af FerryBox-data tager betragtelig tid på grund af de store datamængder og manglende automatiske rutiner til dette formål. Eksempelvis er målingerne af turbiditet meget forskellige mellem de to sensorer med en klar tendens til drift i AML MicroX og ekstrem stor variabilitet i Turner C3. Der var også tydelig drift i pCO₂-sensoren, som kun fungerede delvist i 2019, og den nåede urealistisk høje niveauer (>600 ppm). Derfor betragtes turbiditet og pCO₂ data ikke yderligere. Det vurderes dog, at en stor del af kvalitetssikringen af FerryBox-data kan og bør automatiseres.

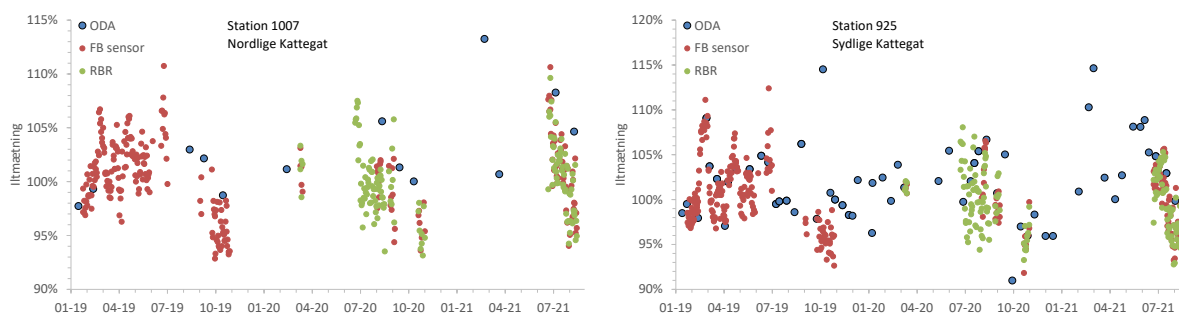


Figur 4: Rumlig variation i salinitet, temperatur, ilt, klorofyl-fluorescens og CDOM over transekter mellem Oslo og Kiel eksemplificeret for 2 transekter i 2020 (7-9 august) og 2 transekter i 2021 (10-12 august).

FerryBox-transektet skærer igennem marine vandmasser med forskellige fysiske og kemiske egenskaber. Saliniteten stiger fra Kiel Bugt (10-15 i overfladen) til Skagerrak (~32), hvorefter saliniteten falder igen ind igennem Oslofjorden (**Figur 4**). Det bemærkes, at der i Skagerrak området ofte vælges en

rute tæt på den svenske kyst (for at udnytte den nordgående strøm), hvor udstrømning fra Göta elven medfører lavere saliniteter. Derimod vælges oftest en mere vestlig rute, når færgeren sejler sydpå for at undgå den nordgående strøm. Temperaturen ændrer sig også hen over transekten, typisk op mod 5 °C, men den rumlige gradient varierer meget henover året.

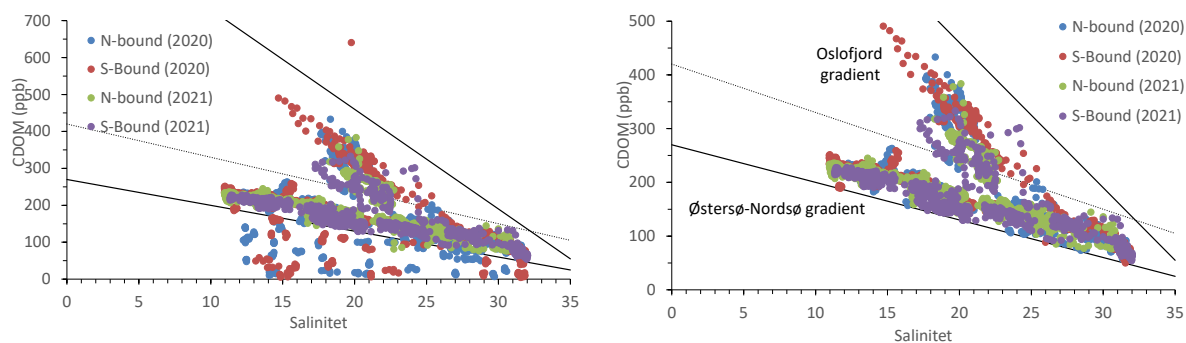
Iltforholdene varierer svagt over transekterne og er stort set i balance med atmosfæren (**Figur 4**). Dog kan det undre, at overfladevandet er undermættet i august måned, hvor der stadig er meget lys og hvor overvågningsdata generelt indikerer overmættede iltkoncentrationer. Dette kunne indikere, at iltensoren ikke er helt korrekt kalibreret. Dette underbygges yderligere af tidsserier for iltmætningen på overvågningsstationer, hvor der er en tendens til at FerryBox-data i visse perioder ligger generelt lavere end overvågningsdata (**Figur 5**). Det vides ikke, hvor hyppigt iltensoren på FerryBoxen kalibreres, men det anbefales at foretage hyppigere kalibreringer for at undgå drift i iltdata.



Figur 5: Tidsserier af iltmætning fra FerryBox data og overvågningsdata på to stationer langs transekten. Eksemplet illustrerer en drift i iltmålinger fra FerryBox i forhold til overvågningsdata.

Klorofylmålingerne varierer kraftigt langs transektet med en tendens til højere niveauer i Storebælt og Kiel Bugt i forhold til generelt lave niveauer mellem 1 og 2 µg/L i Kattegat og Skagerrak (**Figur 4**). Dog stiger klorofylfluorescensen en smule ind gennem Oslofjorden uden dog at nå tilsvarende høje niveauer som i Storebælt og Kiel Bugt. Det skal bemærkes, at klorofylsignalet er noget mere støjbehæftet i 2020 sammenlignet med 2021, men årsagen hertil kendes ikke. Det formodes, at de hurtige variationer i 2020 (skift mellem niveauer uden gradvis ændring, som optræder indenfor nogle få hundrede meter i åbent vand) skyldes problemer med sensoren. Tilsvarende problemer ses ikke i klorofylfluorescens data for 2021. FerryBox-klorofylmålinger vil blive sammenlignet i detaljer med overvågningsdata i afsnit 3.4.

Tilsvarende problemer ses med CDOM-sensoren i 2020, hvor der til tider optræder kraftige fluktuationer og dyk i signalet (**Figur 4**). Der ses også en del toppe (spikes) med usædvanlig høje værdier, som dog efterfølgende er fjernet til de videre analyser (**Figur 6**). Disse problemer optræder i perioder og ses ikke for alle data. Når der ses bort fra disse problemer, så er der en tydelig faldende gradient igennem de indre danske farvande, som stemmer overens med større mængder af organisk materiale i vandet fra Østersøen i forhold til Nordsøen. Dog bemærkes en kraftig stigning i mængden af CDOM ind gennem Oslofjorden, hvilket skyldes en øget påvirkning af terrestrisk materiale. Dette ses også i den faldende salinitet (**Figur 4**). CDOM-data viser derfor umiddelbart to opblandingskurver, en for de indre danske farvande op til Skagerrak og en for Skagerrak ind gennem Oslo-fjorden (**Figur 6**).



Figur 6: CDOM mod salinitet for eksemplerne i Figur 4 med de rå data (venstre) og kvalitetssikrede data (højre). Kvalitetssikringen består i at definere nogle områder (X-Y plan) for realistiske værdier af CDOM mod salinitet for henholdsvis de åbne farvande og Oslofjord (angivet ved linjer).

Overvågningsdata fra stationer tæt på transekten (**Figur 7**) er hentet fra ODA/VANDA, SMHI og NIVA, således at der er etableret et valideringsdatasæt baseret på danske, svenske og norske overvågningsdata. FerryBox-data er kombineret med disse overvågningsdata ved at aggregere (gennemsnit) målinger fra transekten med stationsdata ud fra rumlige og tidlige kriterier. FerryBox-data er koblet på stationer, såfremt målingerne på transekten er indenfor 2 km afstand i utm y-koordinaten, dvs. der tages kun højde for nord-syd akse på transekten, da det svarer til den gennemgående gradient i de indre danske farvande. FerryBox-data repræsenterer kun en fast dybde (~4 m), og for sammenligning med overvågningsdata aggregeres disse derfor for dybden 0-5 m. Tidsmæssigt er FerryBox-data og overvågningsdata koblet sammen, hvis data indsamlet på samme dag eller den forrige/efterfølgende dag. Som en yderligere begrænsning må salinitetsforskellen mellem FerryBox-data og overvågningsdata ikke være større end 3 PSU, da der erved er stor risiko for at der er tale om forskellige vandmasser – specielt for station Å17 i Skagerrak. Som en konsekvens af denne aggregering kan der optræde flere Ferrybox observationer til en enkelt prøvetagning i forbindelse med overvågningen, da der typisk er både en nordgående og sydgående transekt foretaget kort tid før eller efter prøvetagningen fra overvågningsprogrammet. Dette har ikke umiddelbar betydning for de statistiske analyser, da ekstraheret klorofyl fra overvågningsprogrammet betragtes som 'ground-truthing', hvilket betyder, at klorofyl a-målingerne benyttes til at forklare variationer i FerryBox-klorofyl-fluorescens. En vigtig forskel i klorofyl a-målingerne fra overvågningsdata er, at i Danmark og Sverige benyttes ethanol til ekstrahering, hvorimod i Norge anvendes methanol.



Figur 7: Stationer med overvågningsdata tæt på FerryBox-transekten indikeret med rød linje.

2.2 Valideringsanalyser og potentielle dataprodukter

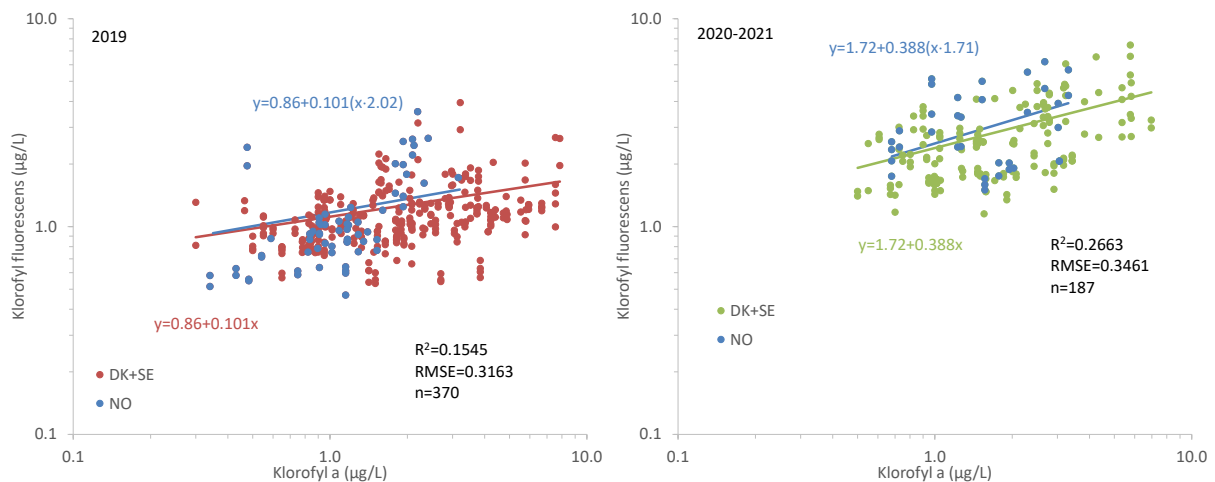
Med baggrund i data fra FerryBox og overvågningen undersøges en række spørgsmål (afsnit 3.2) i det følgende. Dette afsnit afsluttes med en vurdering af konkrete dataprodukter fra FerryBox-data.

2.2.1 Overensstemmelse mellem ekstraheret klorofyl og FerryBox data

Der er en rimelig korrelation mellem FerryBox-klorofyl-fluorescens og ekstraheret klorofyl fra overvågningsprogrammerne i Danmark, Norge og Sverige (**Figur 8**). Der er anvendt en simpel lineær kalibreringsrelation, som indeholder en faktor for anvendelsen af methanol i stedet for ethanol til ekstrahering af klorofyl:

$$FB_{chla} = a + b \cdot chla \cdot f_{methanol} \quad \text{Lign. (1)}$$

Men relationen er bestemt ud fra minimering af fejlen på $\log(FB_{chla})$, idet det antages, at FB_{chla} er lognormal-fordelt. Selvom sammenhængen mellem FerryBox klorofyl fluorescens og ekstraheret klorofyl er signifikant for begge perioder, så er relationerne ikke specielt stærke og forklarer kun ca. 15% og 27% af den samlede variation. Usikkerheden i prædiktionerne er omkring 40% omkring gennemsnitsværdien af ekstraheret klorofyl ($\sim 2 \mu\text{g/L}$) og endnu større for lavere og højere klorofyl-koncentrationer (prædiktionsusikkerheden stiger ud mod enderne af relationen). Ifølge den estimerede model, så er de norske målinger af ekstraheret klorofyl omtrent dobbelt så høje som de svenske og data målinger, hvis FerryBox-målinger bruges som sammenligningsgrundlag.



Figur 8: FerryBox-klorofyl-fluorescens mod ekstraheret klorofyl fra overvågningen for perioderne 2019 og 2020-2021. Danmark og Sverige har brugt ethanol og Norge har brugt methanol til ekstrahering. Bemærk at der er anvendt log-skala på begge akser. Modelinformation er indsat i figuren med farver, som svarer til forskellen mellem ekstraktionsmetoder.

I ovenstående analyse er der vist klorofyl-fluorescens data fra 2019 (Trios microFlu-sensor), men disse data vil ikke blive analyseret videre, da denne sensor ikke længere anvendes på Color Line-transekterne og derfor ikke giver mening i en analyse, der fremadrettet vil undersøge brugbarheden af data.

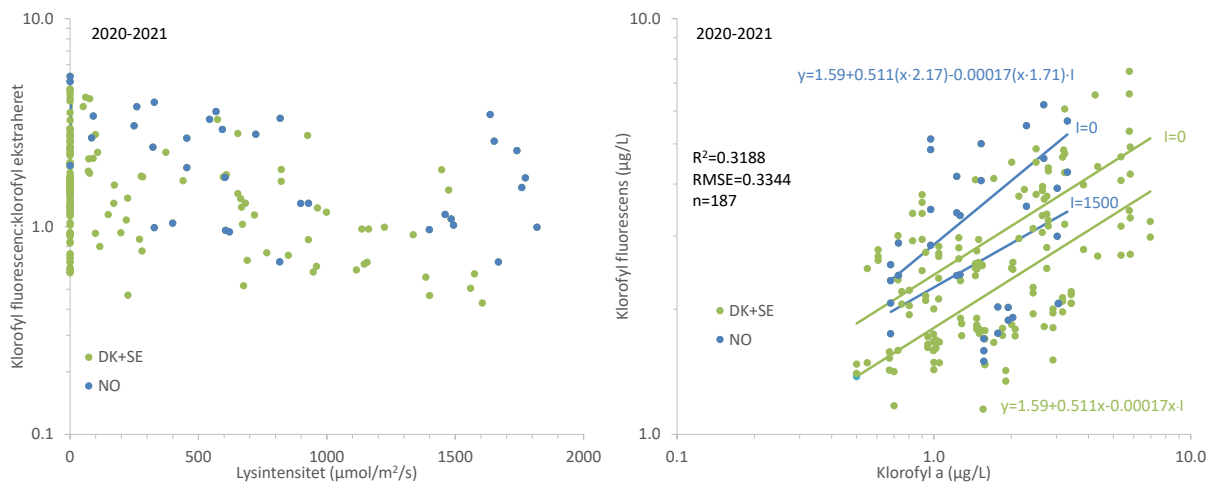
2.2.2 Lysforholds påvirkning af målt fluorescens

For at vurdere om der kunne være en effekt af målingen af fluorescens i forhold til det lys, som planktonet allerede er tilvænnet i omgivelserne, så er FerryBox-målinger af klorofyl-fluorescens koblet til lysindstråling for dagen på året og tidspunktet på dagen. Gennemsnitslys for Danmark til beregning af primærproduktion er anvendt, da der ikke er specifikke målinger af lys i forbindelse med FerryBox-målingerne. Antagelsen er, at plankton, som allerede er udsat for lys, vil have et mindre respons i fluorescens, end plankton målt om natten uden lys.

En første analyse for at vurdere en sådan sammenhæng er at se på forholdet mellem klorofyl-fluorescens fra FerryBox og ekstraheret klorofyl fra overvågningsdata. En afbildning af dette forhold mod den gennemsnitlige lysintensitet i den time, hvor FerryBox-målingen er foretaget, viser et fald, hvilket indikerer, at der kan være en sammenhæng mellem lys og hvor kraftigt respons der er i fluorescens (**Figur 9**). Derfor er modellen udvidet til at medtage en faktor for lys (I), idet det antages, at lysintensiteten giver et respons proportionalt med mængden af klorofyl.

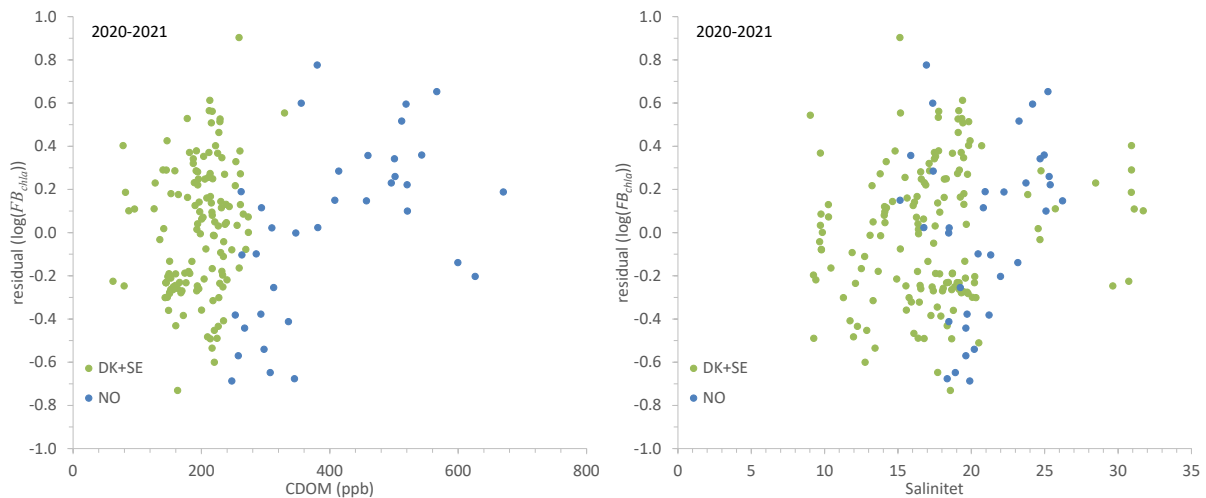
$$FB_{chl a} = a + b \cdot chl a \cdot f_{methanol} + c \cdot chl a \cdot f_{methanol} \cdot I \quad \text{Lign. (2)}$$

Et antal alternative modeller for koblingen til lys er afprøvet, men har ikke vist sig at give en bedre forklaring af data (fx en additiv effekt af lys, en aftagende effekt af lys ($\log(I + 1)$)).



Figur 9: Forholdet mellem klorofyl målt med fluorescens (FerryBox) og målt med ekstraktion i relation til lysforhold (venstre). Relation mellem FerryBox-klorofyl-fluorescens og ekstraheret klorofyl med de bestemte modeller for to forskellige lysintensiteter (0 og 1500 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$). Bemærk at der er anvendt log-skala på begge akser. Modelinformation er indsat i figuren med farver, som svarer til forskellen mellem ekstraktionsmetoder.

Inddragelse af lys som forklarende faktor forbedrer modellen væsentligt, således at den nu forklarer næsten 32% af den samlede variation og residualvariationen er lavere. Den signifikante effekt af lys medfører ca. 25% reduktion i FerryBox-klorofyl-fluorescens, når lysintensiteten er næsten maksimal ($I = 1500 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) i forhold til mørke. Forskellen mellem landenes data er dog stadig signifikant med en faktor 2 højere værdier for norske målinger af klorofyl a, når de sammenlignes på basis af FerryBox-klorofyl-fluorescens. Analyse af residualerne fra modellen (lign. 2) mod andre måleparametre i datasættet indikerer, at der stadig findes variationer i FerryBox-klorofyl-fluorescens, som kunne afhænge af mængden af CDOM og organisk materiale (**Figur 10**).



Figur 10: Residualer fra modellen (lign. 2) plottet mod CDOM og salinitet.

2.2.3 Påvirkning af organisk materiale på målt fluorescens

Opløst organisk materiale fluorescerer (FDOM/CDOM) ligesom planktonalger, når det udsættes for veldefinerede bølgelængder lys. Størstedelen af CDOM bliver dog exciteret og udsender lys ved lavere bølgelængder end klorofyl, men da CDOM har et meget bredt fluorescensspektrum, kan det ikke udelukkes, at en del af CDOM potentielt kan interferere med målingen af klorofyl-fluorescens. Dette kan være en forklaring på, at forholdet mellem klorofyl-fluorescens og ekstraheret fluorescens (**Figur 9**) er generelt højere i Oslo-fjorden, hvor der også er højere niveauer af CDOM (**Figur 4**). Interferens af CDOM på FerryBox-klorofyl-fluorescens kunne derfor være en alternativ forklaring til forskellige ekstraktionsmetoder, som kan forklare de relative høje klorofyl-fluorescensværdier i Oslo-fjorden, hvor ekstraheret klorofyl er forholdsvis lav og næringsstofkoncentrationerne er sammenlignelige med Skagerrak (data ikke vist). Analyse af residualerne fra forrige model (lign. 2) indikerer også, at der kunne være en sammenhæng til mængden af CDOM og salinitet (**Figur 10**).

Opløst organisk materiale er et forholdsvist diffust begreb, som dækker over et meget bredt spektrum af organiske molekyler med vidt forskellige optiske egenskaber. Således falder mængden af CDOM i havvandet fra Østersøen mod Nordsøen (**Figur 4**), men "kvaliteten" af CDOM ændrer sig ligeledes. Vandet i Østersøen har en større andel af humusstoffer og andre organiske stoffer af terrestrisk oprindelse, og det er ligeledes karakteriseret ved en større nedbrydning på grund af den lange opholdstid i Østersøen (ca. 30 år). Vandet i Nordsøen/Skagerrak er derimod karakteriseret ved en relativt større mængde "frisk" organisk materiale af marin oprindelse. Tilsvarende er der en gradient i Oslo-fjorden, hvor Skagerrak-vand opblandes med ferskvand, som har en helt anden karakter end Østersø-vand. Der er derfor tale om to salinitetsgradienter, som udtrykker sig både i mængde og "kvalitet" af CDOM (**Figur 6**), hvilket kan have betydning for den mulige interferens på klorofyl-fluorescens. Da der kan være betydelig forskel i de to gradienter og formålet med nærværende rapport er at vurdere potentialet for FerryBox-målinger af klorofylfluorescens i de danske farvande, begrænses analysen til kun at medtage data op til Skagerrak (dvs. data fra Oslo-fjorden udelades).

Den potentielle effekt af CDOM og salinitet beskrives ved at antage, at der er et CDOM-bidrag fra Østersøen $E_{\text{ØS}}$ (salinitet=10) og et fra Skagerrak E_{SK} (salinitet=32), og bidraget fra vandmasser med en salinitet mellem 10 og 32 bestemmes ud fra en lineær relation mellem de to bidrag.

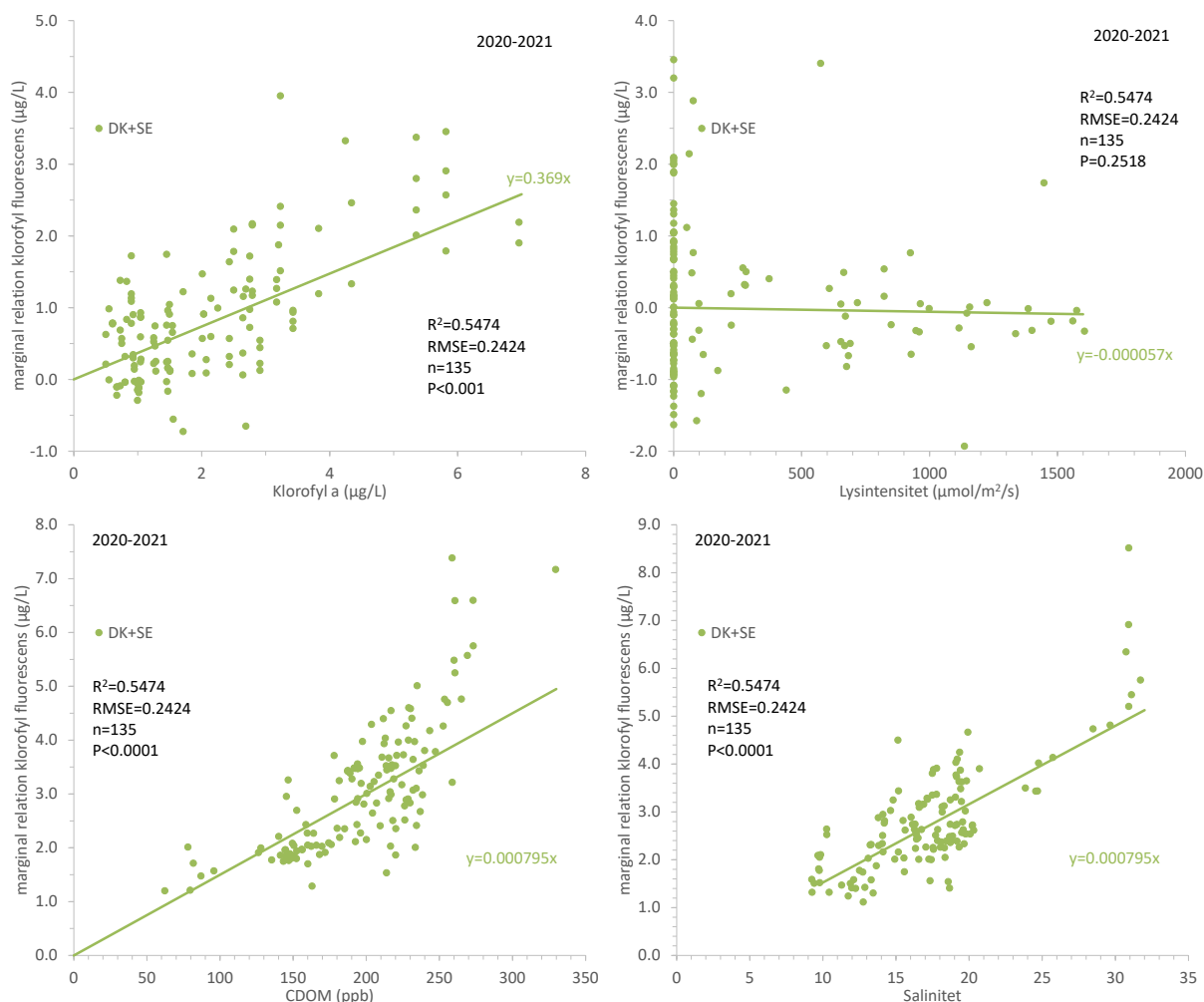
$$E_{\text{CDOM}} = E_{\text{ØS}} \cdot \frac{(32 - \text{salinitet})}{22} + E_{\text{SK}} \cdot \frac{(\text{salinitet} - 10)}{22} \quad \text{Lign. (3)}$$

Dette bidrag (E_{CDOM}) angiver en relativ mængde af CDOM, som påvirker målingen af klorofyl-fluorescens

$$FB_{chl a} = a + b \cdot chl a + c \cdot chl a \cdot I + E_{CDOM} \cdot CDOM \quad \text{Lign. (4)}$$

Den udvidede model består derfor af 4 komponenter, hvor de to første led angiver en 'ren kalibreringskurve', det tredje led angiver, hvordan koefficienten i denne kalibreringskurve afhænger af lysintensiteten for algerne, og det sidste led beskriver en interferens af CDOM på fluorescensmålingen, hvor effekten af denne interferens afhænger af salinitet.

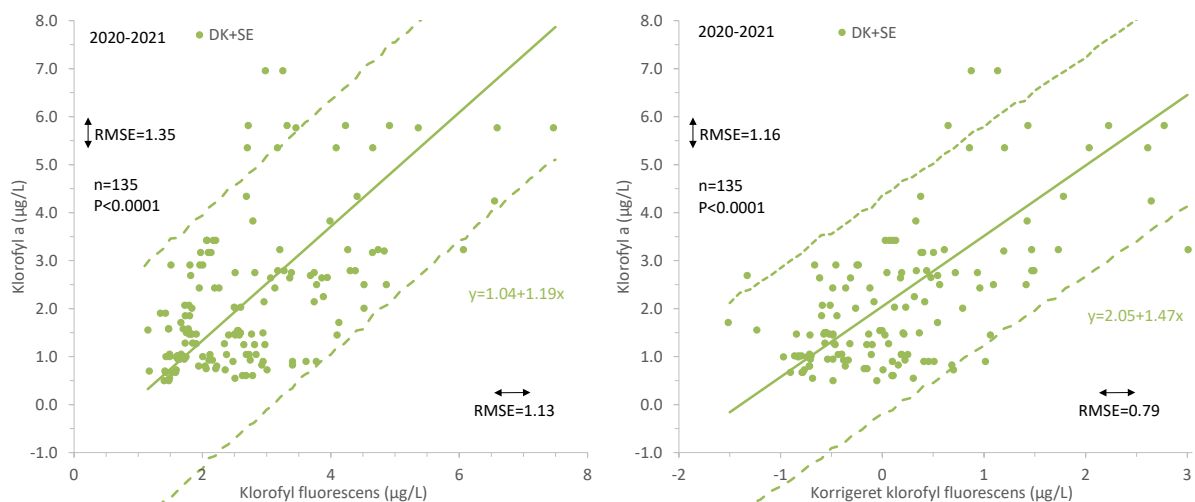
Bestemmelse af modellen (Lign. 4) på danske og svenske data gav en markant bedre beskrivelse af data med en forklaringsgrad på næsten 55% og en mindre residualspreddning (RMSE=0.2424 svarende til en relativ usikkerhed på 27%) sammenlignet med modellen, som kun tog lys i betragtning (Lign. 2). Alle komponenter var stærkt signifikante ($P(a = 0) = 0.0092$, $P(b = 0) < 0.0001$, $P(E_{\emptyset S} = 0) < 0.0001$, $P(E_{SK} = 0) < 0.0001$) med undtagelse af lysafhængigheden, som ikke var signifikant forskellig fra nul ($P(c = 0) = 0.2518$). Dette ses tydeligt, når de marginale relationer for de 4 komponenter afbildes (**Figur 11**), hvor der ikke er nogen markant kobling til lysintensitet i modsætning til de 3 andre komponenter. Umiddelbart ville man forvente en quenching-effekt i forhold til lysforholdene (mindre fluorescens for de lys-adaptede alger), som det ofte ses på *in situ*-fluorescens profiler. Men i FerryBox'en pumpes vandet ind igennem slanger før der måles, og da algerne regulerer deres quenching effekt indenfor sekunder eller få minutter (Liu & Georgakakos 2021), så er det sandsynligt, at målingerne med FerryBox-klorofyl-fluorescens ikke er væsentligt påvirket af quenching. Det skal bemærkes, at den kombinerede effekt af CDOM og salinitet ($E_{CDOM} \cdot CDOM$) stort set forklarer samme mængde variation i $FB_{chl a}$ som målt ekstraherede klorofyl ($b \cdot chl a$). CDOM-interferens på klorofyl fluorescens er en ofte overset faktor, da klorofyl-fluorescens typisk kalibreres med målt klorofyl på en vandmasse med mindre variation i CDOM. Derimod har det stor betydning, når den samme kalibrering benyttes over vandmasser med vidt forskellig CDOM-karakteristik, såsom en transekt igennem de indre danske farvande. CDOM-interferens kan også påvirke vertikale profiler, når mængden og sammensætningen af det opløste organiske materiale varierer kraftigt mellem de enkelte vandlag. Eksempelvis er det dokumenteret for dybe profiler i Stillehavet og Sortehavet (Xing *et al.* 2017). Disse analyser tyder på, at en simple kalibreringskurve bestemt udelukkende ud fra målt ekstraheret klorofyl og FerryBox-klorofyl-fluorescens resulterer i værdier, som er behæftet med større usikkerhed og er systematisk forkerte i områder, hvor CDOM-kvantitet og -kvalitet afviger fra kalibreringsdata. FerryBox-klorofylfluorescens kalibreret på data fra Oslo-fjorden vil derfor give stærkt afvigende klorofylværdier for de indre danske farvande. En kalibreringsformel bør desuden tage hensyn til variationer i CDOM.



Figur 11: De marginale relationer for FerryBox-klorofyl-fluorescens mod de fire parametre: a) målt klorofyl, b) lysforhold, c) CDOM og d) salinitet. Marginale relationer bestemmes ved at fjerne effekten af andre forklarende parametre i modellen (Lign. 4). Modelinformation er indsat i figuren.

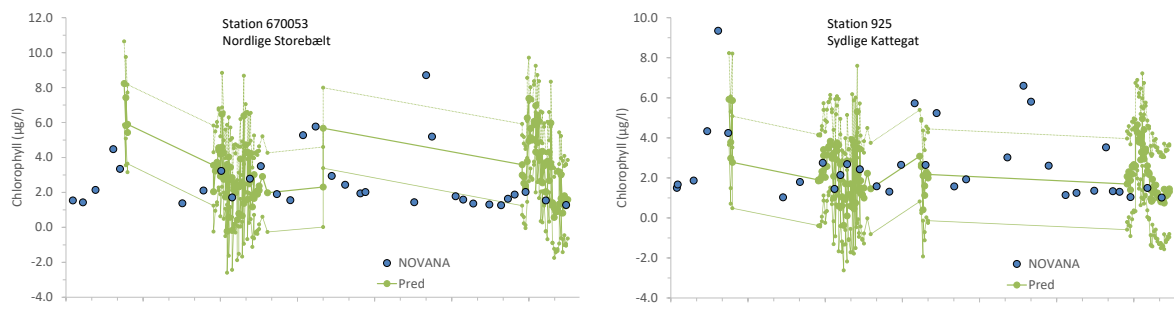
2.2.4 Anvendelse af FerryBox-målinger

For at undersøge mulighederne for at anvende FerryBox-klorofyl-fluorescens til at supplere de eksisterende overvågningsdata er der i første omgang etableret kalibreringsrelationer mellem målt ekstraheret klorofyl og henholdsvis 1) målt FerryBox-klorofyl-fluorescens og 2) FerryBox-klorofyl-fluorescens korrigeret for variationer i CDOM (Lign. 4). Der er ikke korrigeret for lysintensiteten, da den ikke var signifikant. Relationerne er bestemt ved en type II-regression, dvs. med usikkerhed på begge akser, på ikke-transformerede data, da korrektionen for CDOM medfører negative værdier (**Figur 12**). Korrektionen for CDOM medfører en mere sikker prædiction af klorofyl a, hvilket ses af den reducerede RMSE-værdi for klorofyl a. Dog er usikkerheden i prædictionen stadig betragtelig, om end den er sammenlignelig med residualvariationen i statistiske modeller til beskrivelse af variationen i klorofyl a (Carstensen 2007, Carstensen & Lindegarh 2016). I henhold til modellen er det muligt at prædiktere klorofyl a indenfor ± 2 µg/L med 95% konfidens. Den rumlige heterogenitet i klorofyl-fluorescens er ligeledes betragtelig (**Figur 4**).



Figur 12: Relation mellem målt klorofyl a og henholdsvis målt FerryBox-klorofyl-fluorescens (venstre) og FerryBox-klorofyl-fluorescens korrigeret for CDOM (højre). De stiplede linjer angiver 95% konfidensgrænser for prediktionen af klorofyl a. Modelinformation er indsat i figuren.

Det er umiddelbart svært visuelt at vurdere, hvor godt estimerede tidsserier af klorofyl a estimeret ud fra FerryBox-data stemmer overens med målte værdier for overvågningen, da prædiktionen har et bredt konfidensinterval og der kun er få tidsmæssigt overlappende observationer mellem overvågningen og FerryBox-data (**Figur 13**). Overvågningsdata ligger dog pænt indenfor prædiktionsintervallet for klorofyl a bestemt ud fra FerryBox-data, og de fleste målinger ligger tæt på selve prædiktionsværdien.



Figur 13: Tidsserier af målt klorofyl a og prædikteret klorofyl a ud fra FerryBox-data for to stationer med hyppige målinger. Små symboler og tynde streger angiver 95% konfidensgrænser for prædiktionen af klorofyl a.

3 FerryBox-overvågning i de åbne danske dele af Nordsøen

Som med analysen af data fra Color Line i de indre danske farvande (Kapitel 2), er det primære formål med analysen af data fra Nordsøen at undersøge om målinger af klorofyl-fluorescens fra FerryBox kan supplere overvågningsdata.

Der er forskel på de to analyser, da data for de indre danske farvande kommer fra FerryBox'en på Color Fantasy, en passagerfærge der sejler på en fast rute mellem Oslo og Kiel, mens FerryBox-data i Nordsøen kommer fra FerryBox monteret på fragtskibe som sejler forskellige ruter. Disse skibe sejler den samme rute i en periode (f.eks. fra Immingham i nordøst England til Göteborg i Sverige) men ruterne er ændret flere gange. Der er ikke blevet sejlet på ruten Immingham-Göteborg siden oktober 2020, men siden da bliver der sejlet 3 gange om ugen frem og tilbage mellem Immingham og Esbjerg. Status den 1. maj 2022 var at der sejles stadig på Immingham-Esbjerg ruten og i de første 120 dage af året var der blevet sejlet 93 gange mellem de to havne.

Det overordnede spørgsmål, der skal besvares i dette kapitel, er om vi kan kombinere målinger fra flere ruter i den danske del af Nordsøen, som ikke bliver besejlet så ofte. Herunder skal vi undersøge 3 typer af målinger:

1. Temperatur, salinitet og llt
2. Klorofyl-fluorescens
3. pH og pCO₂

3.1 Datagrundlag

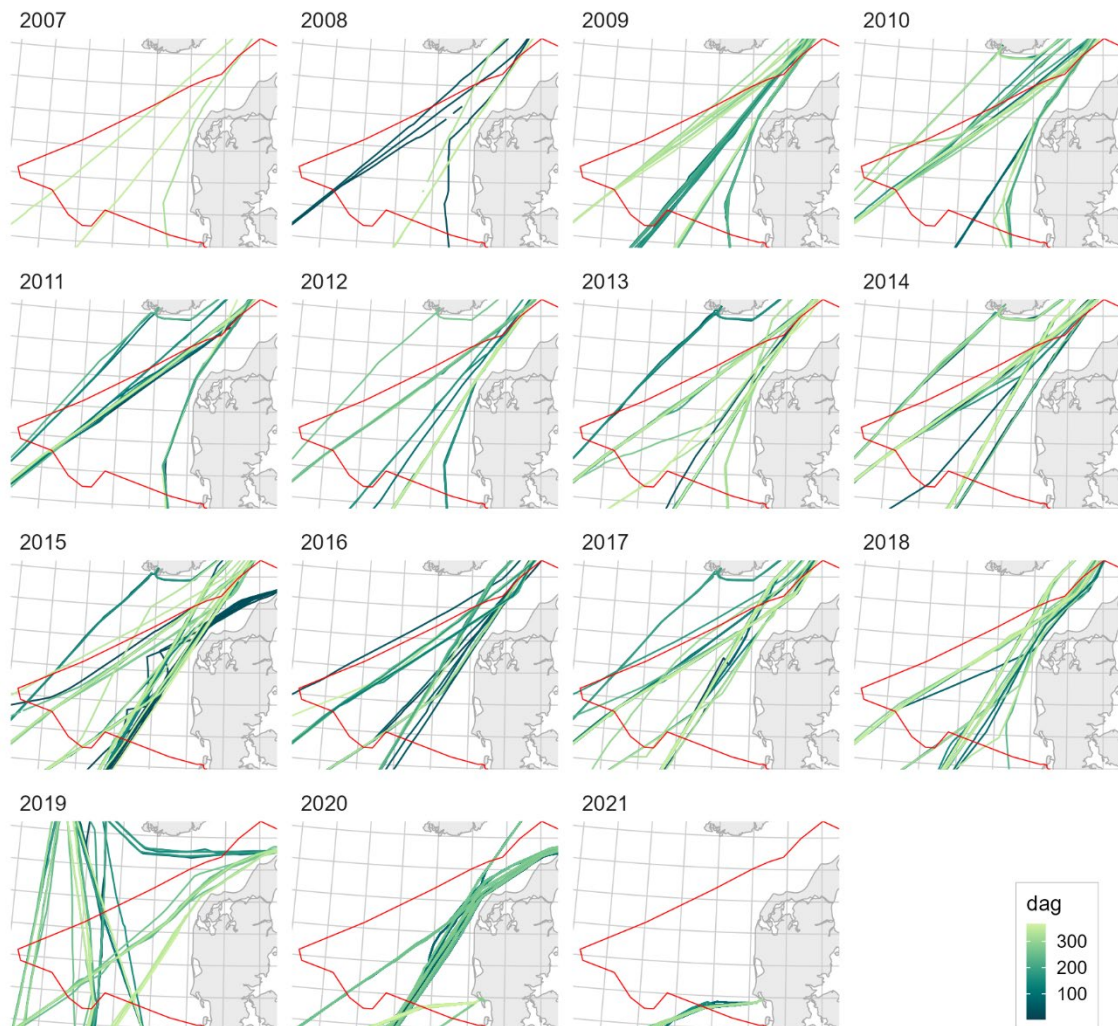
Data for FerryBox i Nordsøen er hentet fra Helmholtz-Zentrum Hereon (HZH), Institute of Carbon Cycles, (f.hv. Helmholtz-Zentrum Geesthacht, HZG, Institute of Coastal Ocean Dynamics), som samler og vedligeholder data. Figurerer og kort over enkelte FerryBox-sejladser kan tilgås på <https://ferrydata.hzg.de> og herfra kan man også downloade data uden betaling (login kræves).

Ifølge HZH sejler flere skibe med FerryBox, men det fremgår ikke af de indhentede data hvilket skib har sejlet den enkelte sejlad. **Figur 1** viser den samlede rumlige dækning af FerryBox-transekter i Nordsøen mens **Figur 14** viser hvordan dækningen af ruter igennem den danske del af Nordsøen varierer hvert år fra 2007 til 2021. Selvom der er en variation i afstand til kysten, løber de fleste ruter fra sydvest mod nordøst (el. omvendt) langs den jyske vestkyst med skibe der sejler fra, eksempelvis, England eller Belgien ind i Skagerrak eller omvendt. Enkelte ruter krydser den danske EEZ i en nord/syd retning (se 2019) og fra oktober 2020 starter op den ovennævnte ny rute mellem Esbjerg og England.

Hvert datapunkt i HZHs FerryBox-database har et kvalitetsflag, som har en af følgende værdier:

- 0 ikke kvalitetssikrede data
- 1 gode data
- 2 sandsynligvis gode data
- 3 sandsynligvis dårlige data
- 4 dårlige data

Data med kvalitetsflagene 3 eller 4 er blevet fravalgt i download processen og dermed kasseret inden analysen er begyndt.



Figur 14: Ferrybox ruter igennem Nordsøen per år fra 2007 til 2021. Farveskalaen indikerer dagen i året (0-365).

Der er hentet data for 16 forskellige parametre (**Tabel 2**) hvoraf klorofyl a-fluorescens bliver målt med 3 forskellige instrumenter. Tabellen viser også, hvor mange dage hvert år der findes data for hver parameter for hvert år. Som forventet er der en sammenhæng mellem antal dage med målinger på tværs af parametrene. Når et skib sejler, så bliver målinger som udgangspunkt taget for alle parametre. Variationen mellem parametrene kan skyldes at der er problemer med en enkelt sensor. Siden instrumentet TriOS microFlu måler både klorofyl-fluorescens og CDOM-fluorescens, kan man undre sig over at, mens der er målinger af klorofyl helt fra 2012 med dette instrument, der stort set kun målinger af CDOM fra 2019, dog med enkelte målinger i 2017 og 2018. Om dette skyldes, at CDOM-data ikke er gemt af HZH eller de er blevet markeret som dårlige og dermed ikke hentet, er ikke undersøgt.

Der kan også ses en generel år-til-år-variation i antal dage med målinger som resultat af variation i antal sejlads igennem danske farvande. 2007 og 2008 har relativt få dage med data men i 2014 og

2015 er der næsten 200 dage hvor der findes FerryBox-data. I de efterfølgende år er der lidt færre data, men det bemærkes at året 2020 ikke ser ud til at have færre dage med data end 2019, på trods af COVID-19.

Tabel 2: Overblik over målte parametre fra FerryBox i Nordsøen med antal dage hvert år med målinger.

Parameter	Instrument	Unit	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
CDOM	TriOS microFlu												11	2	102	113	73
Chl bluegreen	BBE AlgaeOnlineAnalyser	µg/l	5		76	34	66	113	148	159	157	106	116	28	104	1	2
Chl cryptho	BBE AlgaeOnlineAnalyser	µg/l	5		77	34	69	113	148	159	157	106	116	28	104	1	2
Chl diatoms	BBE AlgaeOnlineAnalyser	µg/l	5		79	34	69	113	148	159	157	106	116	28	104	1	2
Chl green	BBE AlgaeOnlineAnalyser	µg/l	5		79	34	69	113	148	159	157	106	116	28	104	1	2
Chl a	BBE AlgaeOnlineAnalyser	µg/l	5	2	76	34	69	113	148	159	157	106	116	94	83	1	2
Chl a	TriOS microFlu	µg/l			11			73	100	159	157	122	120	68	87	148	134
Chl a	WET Labs ECO NTU	µg/l													37	103	108
Cond	Teledyne Citadel TS-NH	mmho/cm	10	12	129	79	92	113	158	182	183	122	120	133	83		
DO sat	Aanderaa optode	%	9	12	130	73	92	113	158	182	193	122	120	134	120	149	134
DO conc	Aanderaa optode	µmol/l						12	110	182	149	122	120	133	120	149	132
pCO2	4H-JENA CONTROS HydroC CO2	µatm													45	148	127
pH	Meinsberg EGA	pH	10	6	109	66	92	40	28	150	193	122	120	132	120	149	133
Salinity	<i>flere instrumenter</i>		10	12	131	80	92	113	158	182	193	122	120	133	120	149	132
Temp	<i>flere instrumenter</i>	°C	10	12	131	79	92	113	158	182	193	122	120	133	164	149	132
Turbidity	Endress and Hauser Turbimax	FNU													45	149	134
Turbidity	Endress and Hauser (model ukendt)	FTU	5	9	32	33		73	110	182	162	122	120	134	83		
Turbidity	Turner SCUFA	NTU	5	11	115	78	92	113	158	182	172	122	120	4	45	149	133
Turbidity	WET Labs ECO NTU	NTU													37	100	122

Validering af FerryBox-data i Nordsøen er gennemført udelukkende med danske overvågningsdata, hentet fra <https://odaforalle.au.dk>. Det var muligt finde data fra ODA for følgende parametre:

1. Chlorophyl (ukorr.) (µg/l)
2. Oxygen indhold (%)
3. Oxygenmætning (%)
4. Salinitet
5. Temperatur (°C)

3.2 Validering

3.2.1 Kombineret af FerryBox- og valideringsdata

For at undersøge relationerne mellem Ferrybox-målinger og overvågningsdata, er det nødvendigt at finde målinger fra Ferrybox-ruter der passer sammen med prøvetagninger fra overvågning. Hvis vi tager en *in situ*-måling for klorofyl a, så skal vi finde den FerryBox-måling der ligger tættest på, både i tid og rum. Vi laver en såkaldt "match-up". Det er en subjektiv vurdering, hvor tæt på hinanden en valideringsobservation og en FerryBox-observation skal være før de matches. Lempeligere regler for maksimal afstand mellem en FerryBox-måling og en overvågningsmåling giver flere "match-up"-data. For at illustrere dette viser **Tabel 3** hvordan antal "match-ups" varierer afhængigt af grænserne for

afstand og tid mellem klorofyl a prøvetagninger i monitoring og FerryBox-målinger af klorofyl-fluorescens målt med Trios microFlu-fluormeter. Hvis man, for eksempel, siger at de to typer målinger skal finde sted inden for 24 timer af hinanden og med en fysisk afstand mellem målepositioner på mindre end 1 km, så er der ingen "match-ups" over hele den ca. 14 år periode. Hvis man beholder grænsen på 24 timer og udvider søgning til målinger inden for 5 km fra monitoringsstationen, så finder man 9 par-målinger. Som nævnt i forbindelse med beskrivelse af Color Line analyserne, så er målinger fra overvågning aggregeret fra overfladen til 5m dybde, mens FerryBox-data kommer fra ca. 4 m.

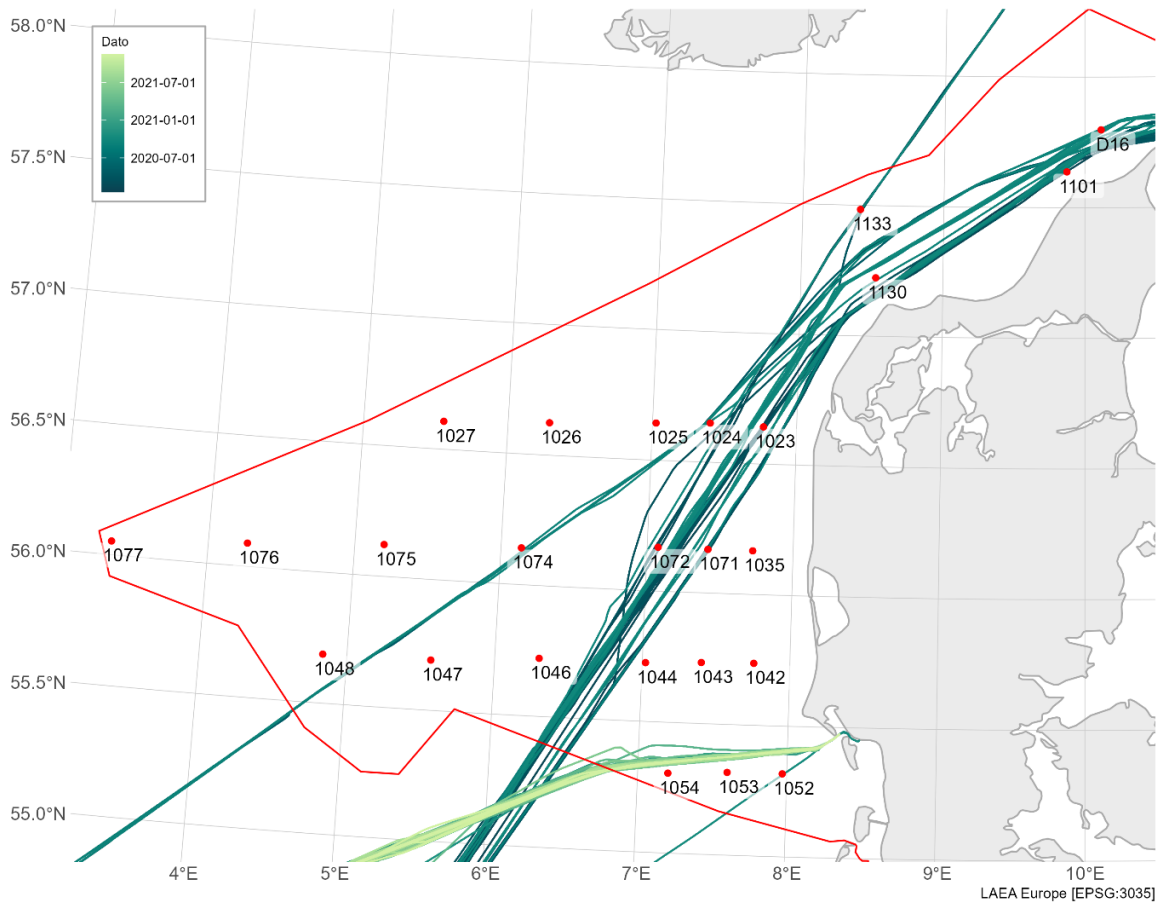
Tabel 3: Variation i antal "match-ups" mellem FerryBox-klorofyl-fluorescens (Trios microFlu) og klorofyl a målt i overvågning, afhængig af grænserne for afstand i tid og rum mellem målinger. Dette er for samtlige observationer i danske monitoringsstationer i perioden 01-07-2007 til 01-11-2021. Bemærk at antal "match-ups" varierer for andre parametre.

n	Maks. afstand km				
	1	2	5	10	
Maks. dage	1	0	0	9	27
	2	0	1	12	37
	3	0	1	14	44
	4	1	5	18	57

I de følgende analyser, har vi anvendt grænserne 10 km og 3 dage mellem målinger, hvilket total set giver 44 "match-up"-observationer. I modsætning til Color Line-analysen er der ikke kigget på salinitetsforskelle mellem FerryBox- og valideringsdata, når man skal kombinere observationer. Der er også en dynamisk blanding i Nordsøen af tre vandmasser: fra Nordatlanten, Østersøen og Tyske Bugt (Salt *et al.* 2012) men det ses også i næste afsnit (3.2.2) at der ikke er så stor forskel mellem salinitet fra FerryBox- og NOVANA-monitoringen.

Denne proces er udført for data fra alle år, men mellem 1. januar 2020 og 1. november 2021 var der kun få FerryBox-ruter (**Figur 15**). I denne period var der "match-ups" for 6 stationer: DMU1023 (2020-02-24, 2020-09-26), DMU1044 (2020-02-26, 2020-09-28), DMU1072 (2020-09-29), DMU1101 (2020-10-01), DMU1130 (2020-02-24, 2020-10-01). Der var yderligere 3 "matches" med stationen NOR7715 (2020-01-28, 2020-03-03, 2020-09-29), som ikke er vist på kortet men ligger tæt på DMU1101.

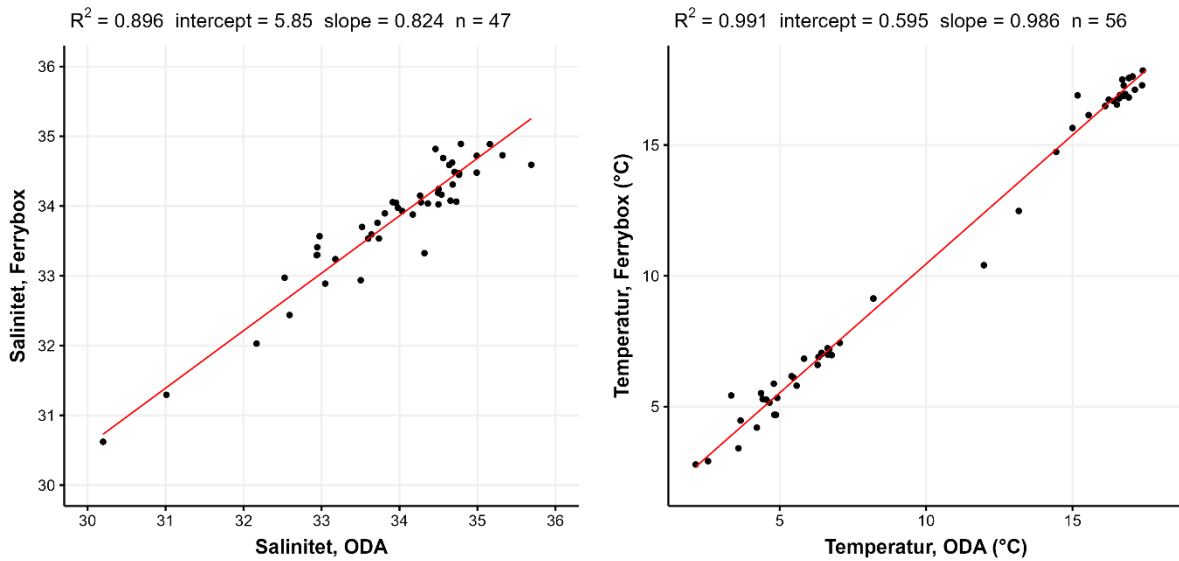
Selvom der bliver sejlet igennem stationerne DMU1071, DMU1024 og DMU1133, så er der ingen "match-ups" på disse stationer. Gennemsejling med FerryBox er ikke fundet sted inden for 72 timer før eller efter monitoringsprøvetagningen. Bemærk også at der ingen kombinationer af FerryBox- og valideringsdata er for sejlads i 2021 (ruterne til/fra Esbjerg).



Figur 15: Ruter igennem de danske dele af Nordsøen i perioden fra 1. januar 2020 til 1. november 2021 samt positioner for NOVANA-stationer.

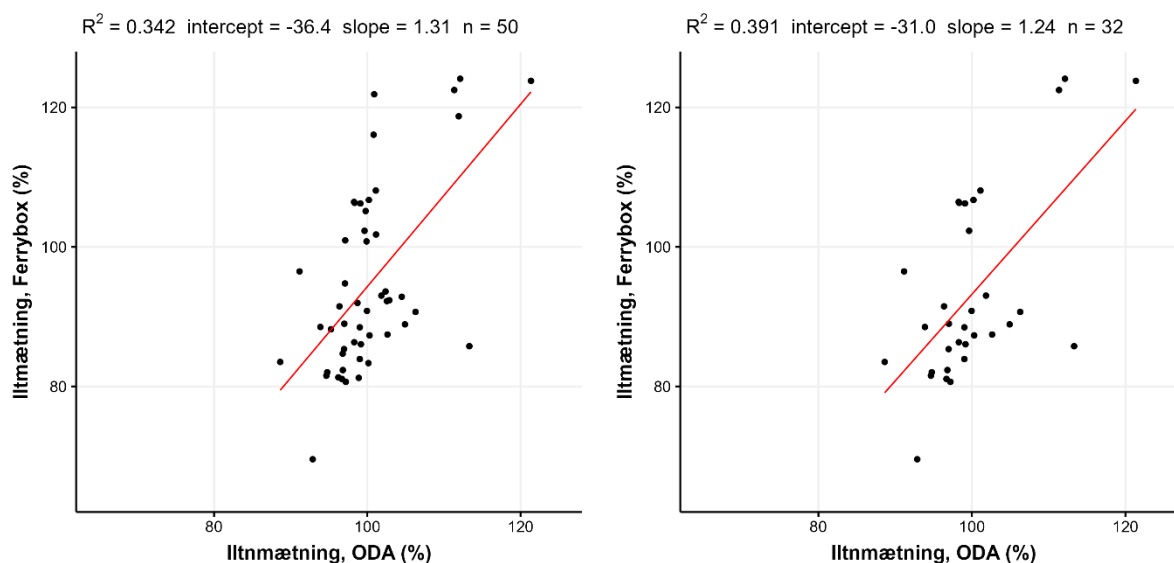
3.2.2 Validering af salinitet, temperatur og ilt

Her bliver der sammenlignet observationer fra FerryBox og overvågningen indsamlet med op til 66 timer (2.8 dage) og 9.9 km forskel. Set i dette lys er data fra de to kilder sammenlignelige. Selvom salinitetsvariationen i Nordsøen ikke er så stor som i de indre danske farvande, kunne en stor forskel indikere, at de to målinger stammer fra forskellige vandmasser. Observationer fra FerryBox fanger 90% af variationen i salinitet i valideringsdata (**Figur 16**). For temperatur er relationen mellem FerryBox- og valideringsdata endnu bedre.



Figur 16: Relation mellem målinger fra ODA og FerryBox for henholdsvis salinitet (venstre) og temperatur (højre).

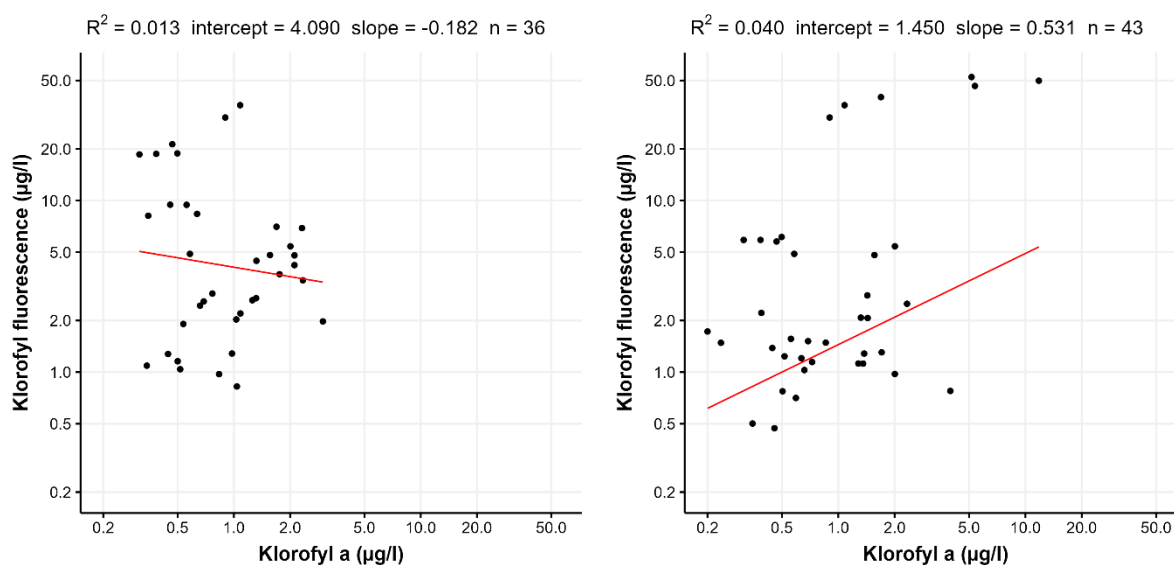
For iltmætningen er der en noget større forskel mellem FerryBox-målingerne og overvågningsdata (**Figur 17**). Denne parameter er også mere dynamisk end salinitet og temperatur på kortere tidsskalaer og kan desuden udvise en mindre døgnvariation. Dette vil medføre en lidt større variation omkring regressionslinjen. Derimod ses også større systematiske afvigelser fra 1:1 relationen. Specielt er iltmætninger fra FerryBox'en relativt lave med mange målinger omkring 80-90%, hvor overvågningsdata viser iltmætninger omkring 100%. Variationsbredden i FerryBox-målingerne er ligeledes noget større end for overvågningsdata. Dette kunne antyde en uhensigtsmæssig kalibrering af sensorerne (en eller flere) anvendt på FerryBox'en. Indsnævring af tidsrummet for "match-up" til 24 timer, således at det samlede antal observationer var 32, havde kun en mindre effekt på regressionen, hvilket indikerer, at forskellen mellem de to typer af data formentlig ikke skyldes 'en grov match-up', men snarere skyldes systematiske fejlmålinger forårsaget af manglende eller ukorrekt kalibrering.



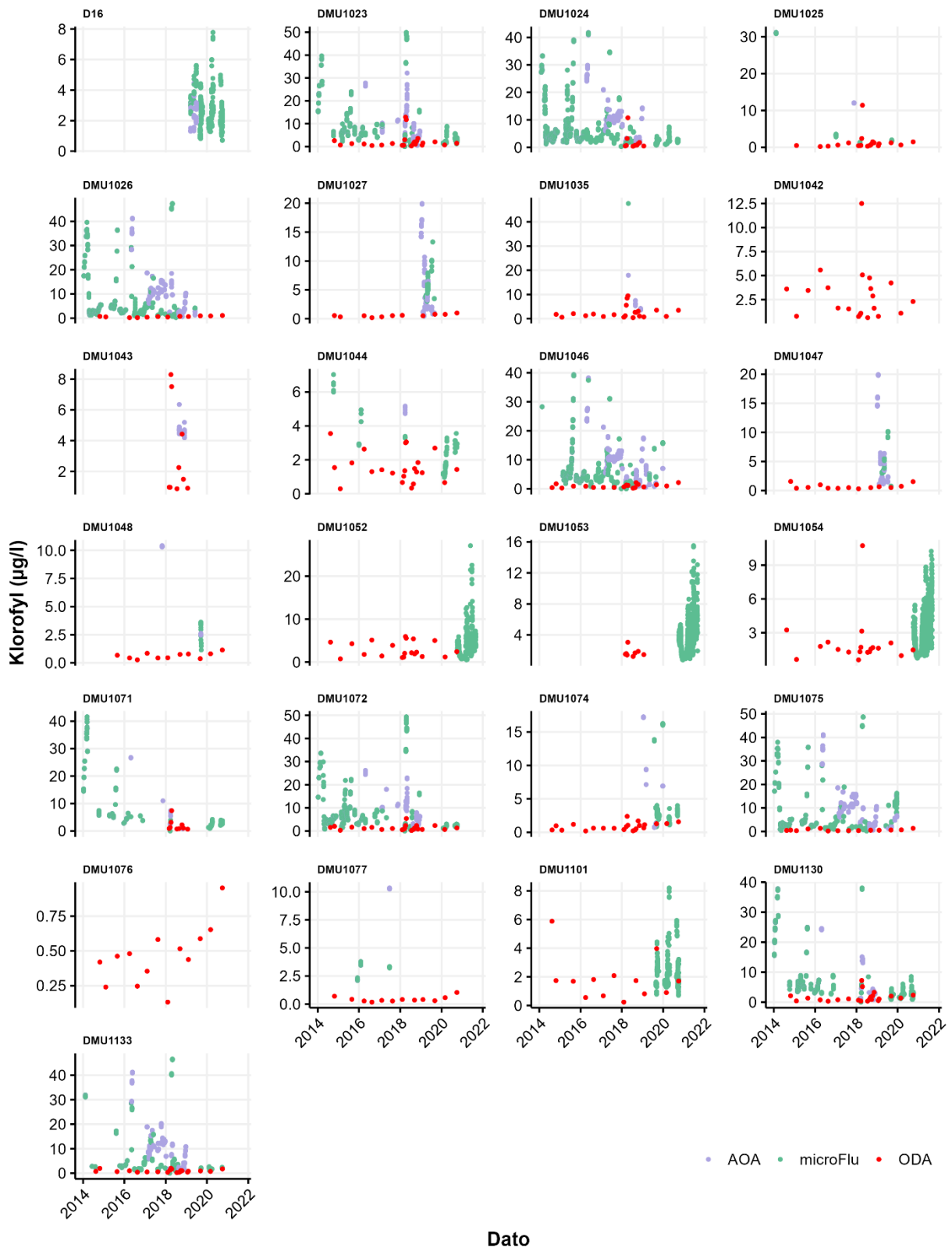
Figur 17: Relation mellem målt iltmætning og FerryBox iltmætning (venstre). Der vises også den samme relation hvor forskellen i måletidspunkter for FerryBox- og monitoringsdata ikke må være større end 24 timer (højre).

3.2.3 Validering og analyse af klorofyl

Der er flere observationer med matchende klorofyl valideringsdata for fluorescens målt med TriOS microFlu-instrumentet end for BBE AlgaeOnlineAnalyser (AOA). Men sammenligning af klorofyl-fluorescens og klorofyl a fra overvågningsdata viser stort set ingen relation mellem de to parametre, uanset om man måler fluorescens med microFlu eller fra AOA (**Figur 18**). Ligeledes er der store systematiske afvigelser og forskelle i variationsområdet ved sammenligning af tidsserierne (**Figur 19**). Klorofylniveauer $>20 \mu\text{g/l}$, som er bestemt med begge FerryBox-sensorer, er usædvanlig høje for et åbent vandsområde. Inddragelse af lysintensitet i relationen gav en forbedring i forklaringsgrad fra 4% til 8%, men dette var ikke statistisk signifikant ($p=0.16$)



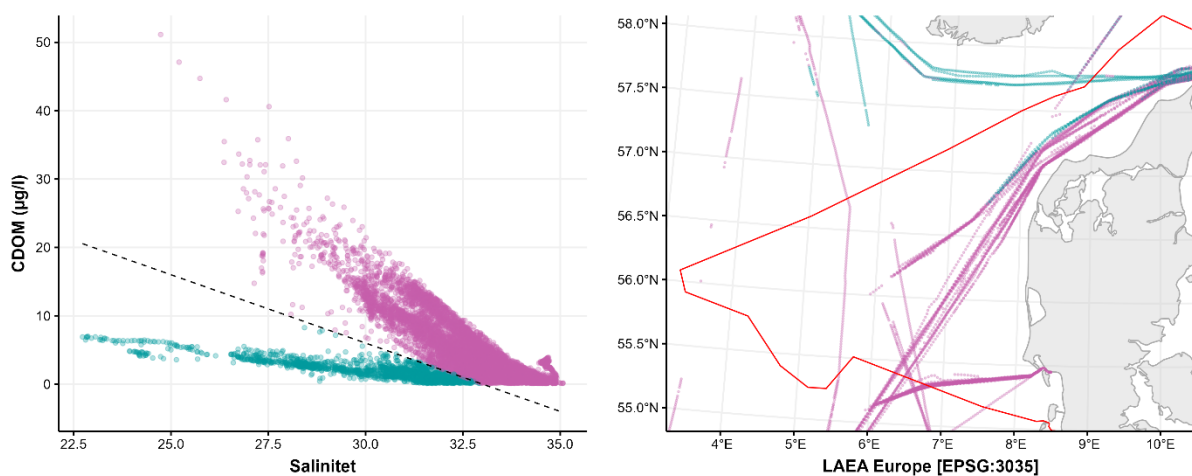
Figur 18: Relation mellem målt klorofyl a- og FerryBox-klorofyl-fluorescens målt med henholdsvis BBE AlgaeOnlineAnalyser (venstre) og TriOS microFlu (højre).



Figur 19: Tidsserier af klorofyl a i monitoringsstationer (rød), sammenlignet med fluorescens fra to FerryBox-sensorer: BBE AlgaeOnlineAnalyser (lilla) og Trios microFlu (grøn).

Der er stor variation i hvor ofte FerryBox-ruter passere monitoringsstationerne. DMU1023 ser ud til at blive passeret hyppigst, men for DMU1042 og DMU1076 er der aldrig FerryBox-ruter, som passerer inden for en 10 km radius. Stationerne langs Esbjerg-ruten (DMU1052, DMU1053 og DMU1054) er blevet passeret (inden for 10km) mange gange i 2021 men desværre er der ingen matchende valideringsdata.

Selvom udgangspunktet var at den "rå" relation mellem klorofyl *a* og fluorescens generelt er dårlig for data fra Nordsøen, blev der også undersøgt om relationen kan forbedres ved at kigge på CDOM, ligesom der bliver gjort med Oslo-Kiel data. I Nordsøen mødes tre vandmasser fra Nordatlanten, Østersøen og Tyske Bugt hvoraf de to sidste har lavere salinitet end vand fra Nordatlanten. Der ses derfor to gradienter i salinitet, som bliver afspejlet i to forskellige CDOM-salinitetsrelationer (**Figur 20**).



Figur 20: Relation mellem CDOM-fluorescens og salinitet i FerryBox-målinger (venstre) som fordeler sig i to grupperinger med forskellige gradienter i CDOM-salinitetsrelationen: en Nordatlanten-Østersø gradient (blågrøn) og en Nordatlanten-Tyske Bugt gradient (lilla). Farverne svarer til dem i kortet (højre) der viser geografisk placering af punkterne. Se også Bilag 2.

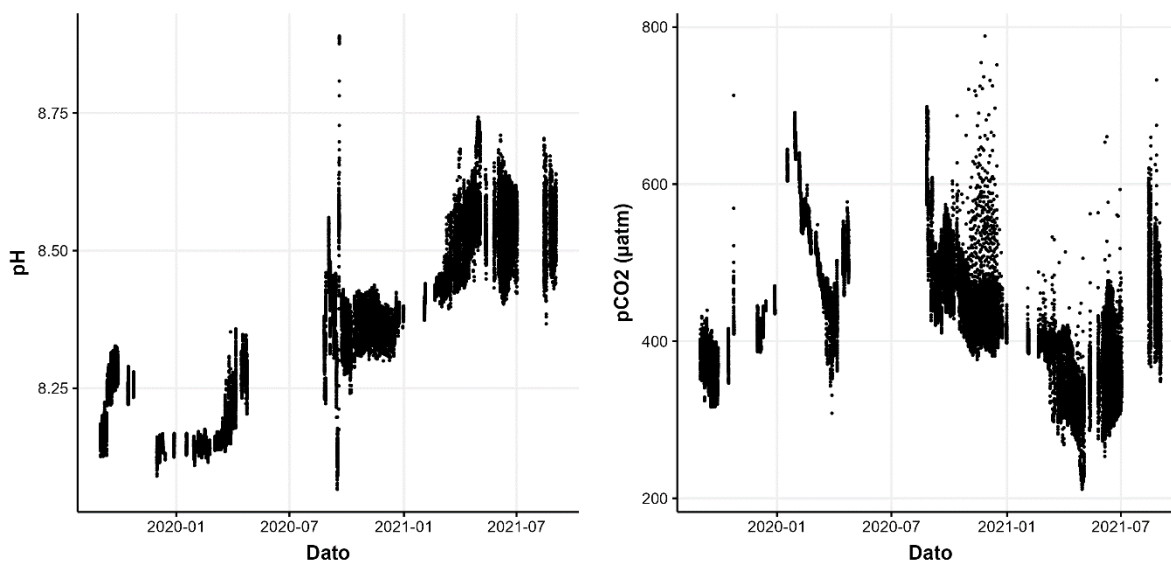
Kan man så opstille en relation mellem fluorescens, klorofyl *a* og CDOM kombineret med en mixing model for 3 vandmasser? Det var desværre ikke muligt at anvende CDOM-målinger til at korrigere klorofyl-fluorescens. En af årsagerne til dette kan være det begrænsede datagrundlag. Der findes kun 8 sæt matchende observationer af klorofyl *a* fra monitoringsdata og klorofyl-fluorescens hvor der samtidig også er en CDOM-fluorescens måling og de kunne bruges til at vise en relation mellem CDOM og klorofyl-fluorescens (se også Bilag 3).

3.2.4 Validering og analyse af pCO₂ og pH

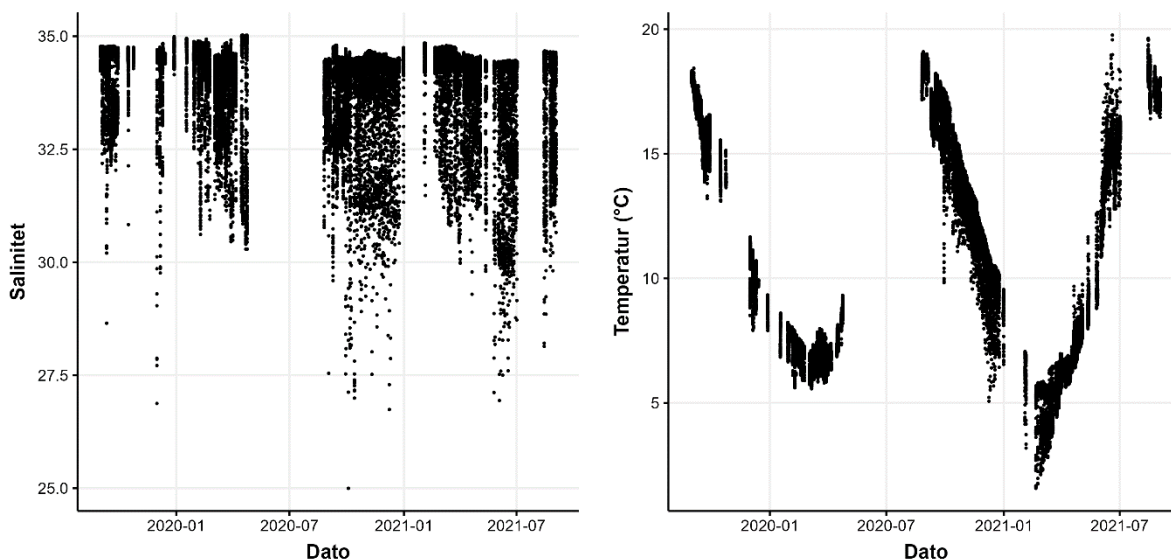
Som beskrevet i review'et om anvendelsen af FerryBox.systemer (afsnit 1.3), kan målinger af komponenterne i det marine karbonatsystem bruges til at fortælle noget om f.eks. primærproduktion. De er også vigtige parametre i forhold til monitoring af klimaforandringerne effekter på havmiljøet, eksempelvis forsuring. Overordnet vil højere koncentrationer af CO₂ i vandet være forbundet med lavere pH, men relationen er ikke-lineær og påvirkes også af andre faktorer, inklusive biologiske processer. En gennemgang af teorien, på dansk, gives i Carstensen *et al.* (2021)

I de danske monitoringsdata for Nordsøen findes der ingen valideringsdata for disse to parametre. Derfor kan der ikke foretages direkte validering af observationerne. Men man kan stadig vurdere niveauer og variationerne ud fra nogle generelle betragtninger.

Målinger af pH findes over hele perioden fra 2007 til 2021 men her fokuseres der på perioden fra august 2019 til oktober 2021 hvor der samtidigt er målt pCO_2 . **Figur 22** viser tidsserier for pH og pCO_2 i denne periode med overlap mellem de to parametre. **Figur 23** viser tidsserier for salinitet og temperatur i den samme periode.



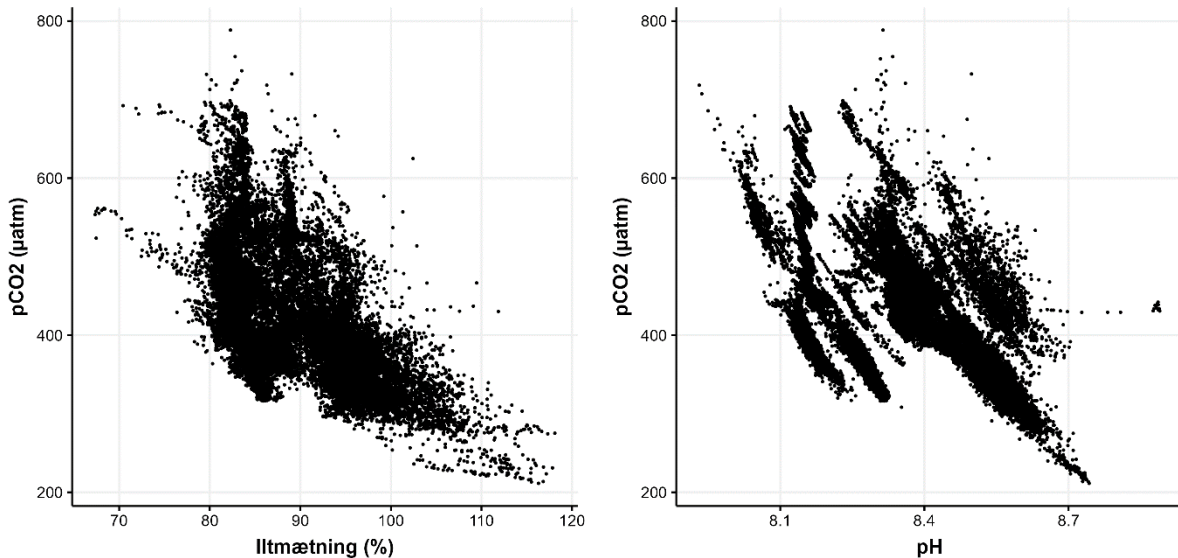
Figur 21: Tidsserier af pH (venstre) og pCO_2 (højre).



Figur 22: Tidsserier af salinitet (venstre) og temperatur (højre).

Overordnet forventes der en invers relation mellem pCO_2 og iltmætningen. Den relation ses i målingerne men med stor spredning (**Figur 23**). Sammenligning af pCO_2 med pH viser også tendens til den inverse relation vi forventer. Her ser det ud til, at der er flere grupperinger af datapunkter som, hver for sig, viser den forventede inverse relation mellem pCO_2 og pH. Det bemærkes dog at der er en del

urealistisk høje $p\text{CO}_2$ -værdier sammenlignede med den forventede sæsonvariation i $p\text{CO}_2$ fra under 300 μatm under forårsopblomstringen, hvor fytoplanktons kulstofoptagelse reducerer koncentration, og op til 400 μatm om vinteren (Omar *et al.* 2019).

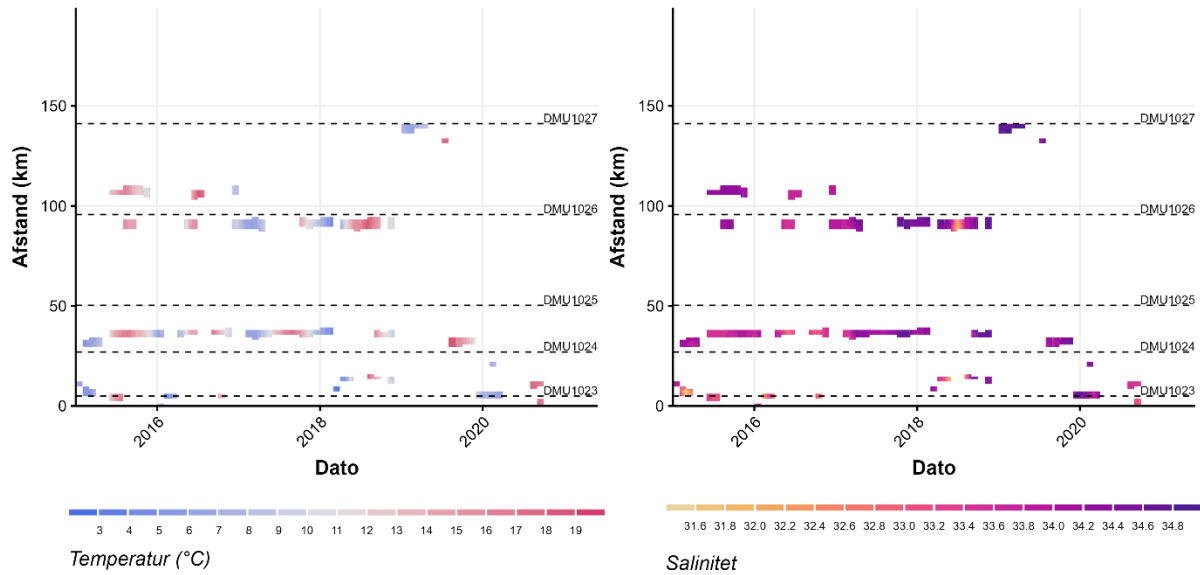


Figur 23: Relationer mellem $p\text{CO}_2$ og Iltmætning (venstre) samt $p\text{CO}_2$ og pH (højre).

Grupperinger af punkter i $p\text{CO}_2$ /pH-relationen kan til dels forklares af et skift i niveau i tidsserien for pH (**Figur 21**). På trods af at der er huller i data, kan der identificeres tydelige stigninger i pH fra februar til april i både 2020 og 2021. Disse stigninger er begge af størrelsesorden 0.2 men sker på forskellige niveauer. Det vil sige fra ca. 8.1 til 8.3 i 2020 og fra 8.4 til 8.6 i 2021. Kan dette niveauskift skyldes at der sejles en anden rute i 2021, mellem Esbjerg og England i stedet for ruten rundt om Skagen? Salt *et al.* (2013) viser variation på denne størrelsesorden på tværs af Nordsøen. Men dette spørgsmål vil nemmere besvares med data til validering af pH. Tidsserien for $p\text{CO}_2$ ser også ud til at vise et niveauskift fra 2020 til 2021, men i begge år kommer målingerne over 600 μatm . Det må derfor konkluderes at kalibreringen af $p\text{CO}_2$ -sensoren (eller sensorerne) ikke er på plads.

3.2.5 Transekter

En måde at kombinere data fra forskellige ruter er at vise en transekt. For at illustrere dette vises salinitet og temperatur på en transekt igennem stationerne DMU1023, DMU1024, DMU1025, DMU1026 og DMU1027 (Figur 24).



Figur 24: Transekter af temperatur (venstre) og salinitet (højre) for en transekt fra station DMU1023 i øst mode station DMU1027 i vest. Stationernes placering ses i Figur 15. Transekten har en rummelig opløsning på 4 km og tidslig opløsning på 30 dage.

4 Overførsel af dataprodukter

Leverancen består af 5 filer i tekstformat (csv):

- 1) Ferrybox-data for Oslo-Kiel
- 2) Oslo-Kiel-data udvalgt til analyser i kapitel 2
- 3) Parameterbeskrivelse for Oslo-Kiel data
- 4) Ferrybox-data for Nordsøen
- 5) Parameter beskrivelse for Nordsø-data

Datafilerne 1), 2) og 4) indeholder følgende kolonner:

- Datetime – dato og tid (UTC) i formatet *ÅÅÅÅ-MM-DD tt:mm:ss*
- Lat – breddegrad, [decimal grader]
- Lon – længdegrad, [decimal grader]
- x – x koordinat i UTM 32 [m]
- y – y koordinat i UTM 32 [m]
- Parameter – navn på målte parameter
- Unit – måleenhed
- Value – måleværdi

Parameterfilerne 3) og 5) indeholder beskrivelser af parametrene i datafilerne.

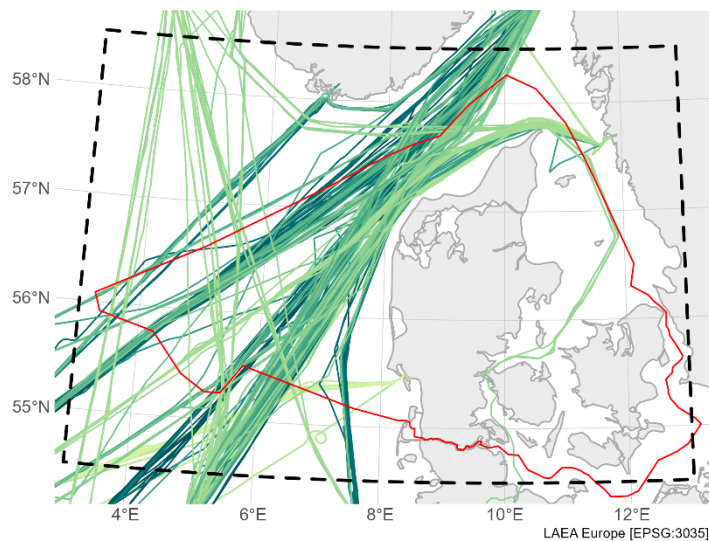
Tidslig opløsning

Data er aggregeret til 1 minuts tidslig opløsning.

Geografisk dækning

Data for Oslo-Kiel-ruten inkluderer observationer langs hele transekten, også de dele af ruten som ligger uden for den danske EEZ.

Data fra FerryBox i Nordsøen inkluderer ligeledes observationer fra uden for den danske EEZ, men målinger er kasseret som ligger uden for området mellem 54.5 og 58.5 °N og mellem 3.0 og 13.0 °E.



5 Konklusioner

FerryBox-data kan levere data med større tidlig og rumlig opløsning end traditionelle overvågningsdata, som typisk kun indsamles 12-24 gange om året på udvalgte stationer. Dermed har FerryBox-data potentialet til at øge informationsmængden i de åbne indre farvande. Ovenstående analyser for Oslo-Kiel-data indikerer, at det er muligt at reproducere klorofyl a-målinger uden systematiske afvigelser, når der tages højde for potentiel interferens fra CDOM. Analyserne viser også, at der ikke er nogen væsentlig quenching effekt i FerryBox'en, hvilket sandsynligvis skyldes, at algerne allerede er tilpasset mørke forhold under pumpningen fra vandindtag (ca. 4 m dybde) til sensoren. Det er derfor sandsynligt, at der kan produceres tidsserier for klorofyl a for de åbne indre danske farvande ud fra FerryBox data, såfremt:

- FerryBox-data kvalitetssikres til et højere niveau end det har været muligt indenfor rammerne af nærværende projekt. Dette vil kræve en dedikeret gennemgang af data fra alle sensorer for hver enkelt transekt af en kyndig person. Kvalitetssikringen bør understøttes af en række analyser på tværs af data, eksempelvis afbildning af CDOM mod salinitet for transekten sammenholdt med tidligere godkendte transekter fra samme årstid.
- Der bestemmes forbedrede statistiske modeller til at korrigere for CDOM-interferens baseret på et udvidet og kvalitetssikret datasæt. Ideelt set bør der etableres et kalibreringsdatasæt på basis af indsamlede vandprøver fra FerryBox'en, så der opnås et bedre tidsligt og rumligt match mellem målinger af ekstraheret klorofyl a og FerryBox-klorofylfluorescens. Dermed bør der kunne etableres mere præcise relationer og et forbedret estimat af usikkerheden ved at prædiktere klorofyl a ud fra FerryBox-klorofylfluorescens. Disse indsamlinger bør dække et helt år, således at det også kan vurderes, om sæsonmæssige successioner i fytoplanktonsamfundet har betydning for relationen mellem ekstraheret klorofyl og fluorescens.
- Prædiktionen af klorofyl a ud fra FerryBox-data vises at være mere præcis end tilsvarende prædiktioner baseret på satellitmålinger. Satellitmålinger kan levere data med samme tidslig opløsning som FerryBox-data og med større rumlig opløsning. Derfor bør der laves en tilsvarende analyse, som kvantificerer eventuelle systematiske afvigelser og usikkerheden på prædiktionerne.

For FerryBox i Nordsøen er der målinger spredt tyndt over et større areal, og der er variation i dækningen over tid, for hver gang en rute besejles og eftersom ruterne bliver ændret (andre anløbshavne) for de fragtskibe, hvor FerryBox er monteret. Dette bidrager til, at det er svært at matche FerryBox-data med overvågningsdata. Når en FerryBox-observation og dens tilsvarende valideringsobservation er målt med flere kilometers afstand og tidsforskel på flere dage, så vil de ikke nødvendigvis repræsentere sammenlignelige prøver. De relativt få valideringsdata kombineret med en mulig svag relation gør det svært at identificere fejlobservationer og etablere korrektionsformler for fluorescens klorofyl. Man kan stille spørgsmålet om en FerryBox er anvendelig i en overvågningssammenhæng, når der er risiko for, at ruter bliver ændret uden varsel.

De indsamlede pCO₂ og pH data kan potentielt give værdifulde bidrag til beskrivelse af forsurening og primær produktion, såfremt disse observationer var bedre kalibrerede og kvalitetssikrede. Specielt sensorer for pH og pCO₂ har en tendens til drift over tid, hvilket nødvendiggør en løbende kalibrering og vedligeholdelse, da data ellers bliver stort set uanvendelige. Desværre viser FerryBox data fra både Color Line og HZH, at der optræder en gradvis drift i disse sensorer, hvorfor det må konkluderes, at disse data ikke er anvendelige på nuværende tidspunkt. Implementering af nye sensorer med

mindre drift vil potentielt kunne gøre denne type data værdifuld i fremtiden. Vores analyser af FerryBox data bekræfter med al tydelighed vigtigheden af en løbende kalibrering og kvalitetssikring af alle typer data. Der skal derfor afsættes tilstrækkelige ressourcer til denne løbende drift, når først sensorerne er indkøbt.

Ved et traditionelt monitoringsprogram prøver man at følge udviklingen i målinger af relevante parametre ved faste intervaller og i faste positioner. For FerryBox'en udfordres dette krav når ruter kan blive lavet om. Ruten mellem Oslo og Kiel havde opereret næsten uafbrudt igennem flere år. Coronakrisen førte til perioder hvor skibene har ligget i havn. Siden slutning af februar 2022 har Color Line igen sejlet fast Oslo-Kiel ruten og ved 1. maj 2022 har der været uafbrudt normal drift siden da. I Nordsøen har ruten fra Immingham i England til Göteborg i Sverige givet en god mulighed for at måle langs en sydvest/nordøst-gående transekt tværs over den danske del af Nordsøen. Denne rute er indstillet i oktober 2020 og nu sejles der mellem Immingham og Esbjerg. Denne rute giver også et øst-vest transekt igennem den danske del af Nordsøen men den ligger mod syd (tæt ved stationerne 1052, 1053, 1054 Figur 15) og er noget kortere.

Afslutningsvis skal behovet for et hyppigere og mere dækkende datagrundlag diskuteres. Klorofyl a indgår i tilstandsvurderingen for både VRD og HSD. Transekten med Color Line går igennem 5 vandområder (Anholt, 12 sm; Kattegat, SØ 12 sm; Storebælt, nord 12 sm; Storebælt, syd 12 sm; Lillebælt, syd 12 sm), hvor den tidlige dækning i NOVANA-programmet er sparsom (fx stationerne i Lillebælt, syd 12 sm besøges 4-5 gange om året) eller den rumlige dækning ikke er helt præcis (station 413 ligger udenfor VRD området). I disse vandområder er det dog kun den status i forhold til miljøfarlige stoffer, som skal vurderes, og derfor vil klorofylmålinger fra FerryBox kun være relevante, såfremt der også skulle foretages en tilstandsvurdering af de biologiske kvalitetselementer i disse vandområder. FerryBox målinger kan derfor på sigt supplere det eksisterende overvågningsprogram, således at der opnås mere præcise tilstandsvurderinger for klorofyl i disse vandområder. Tilstandsvurdering af klorofyl skal ligeledes foretages for HSDs underområder. Disse områder er dog større end vandområderne, og derfor vil effekten af at supplere med FerryBox-data være mindre, da der allerede findes et større datagrundlag for tilstandsvurdering.

Klorofyl a-data indgår i den årlige rapportering af de marine områder (Hansen *et al.* 2021), hvor sæsonvariation og årsmidler for de indre åbne farvande afrapporteres. Disse tidlige variationer er baseret på et forholdsvist stort datamateriale, hvilket resulterer i snævre konfidensintervaller. Hvis overvågningsdata bliver suppleret med klorofyl a estimeret ud fra FerryBox-data, vil det have en mindre effekt på de rapporterede værdier i den årlige rapport. FerryBox-data vil desuden kunne anvendes, hvis der i forvaltningen optræder behov for mere detaljerede analyser af klorofyl a – eksempelvis i relation til specifikke algeopblomstringer. Endelig vil FerryBox-data kunne anvendes som supplerende information til diverse forskningsprojekter, hvor der er behov for observationer med højere tidlig og rumlig opløsning end de normale overvågningsdata kan levere.

6 Referencer

Andersen, J.H., T. Harvey, E. Kallenbach, C. Murray, Dag. Hjermand, T. Kristiansen, K. Sørensen, J. Carstensen, A. Erichsen & L.B. Hansen (2017): Statistical analyses of chlorophyll-a data sampled from the FerryBox on the Oslo-Kiel ferry and the NOVANA programme. NIVA Denmark report, 30 pp. <http://hdl.handle.net/11250/2480242>

Bavel, B., A. Lusher, P.F. Jaccard, S. Pakhomova, C. Singdahl-Larsen, J.H. Andersen & C. Murray (2020): Monitoring of microplastics in Danish marine waters using the Oslo-Kiel ferry as a ship-of-opportunity. NIVA Denmark report, 34 pp. <https://hdl.handle.net/11250/2678966>

Carstensen, J., N. Reducha Andersen, J. Christensen & C. Mohn (2021): Havets pH balance - påvirkning fra klima og næringsstoffer. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 76 s. - Videnskabelig rapport nr. 429 <http://dce2.au.dk/pub/SR429.pdf>

EU (2017) Kommissionens afgørelse (EU) 2017/848 af 17. maj 2017 om fastlæggelse af kriterier og metodiske standarder for god miljøtilstand i havområder samt specifikationer og standardmetoder for overvågning og vurdering og om ophævelse af afgørelse 2010/477/EU. Book L 125/43 <http://data.europa.eu/eli/dec/2017/848/oj>

EuroGOOS <https://www.ferrybox.com/index.php.en>. Accessed Nov. 2021

Groetsch P.M.M., S.G.H. Simis, M.A. Eleveld & S.W.M. Peters (2014): Cyanobacterial bloom detection based on coherence between ferrybox observations. J. Mar. Syst. 140:50-58 <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2014.05.015>

Harvey, E.T., D. Krause-Jensen, P.A. Stæhr, G.B. Groom & L.B. Hansen (2018): Literature review of remote sensing technologies for coastal chlorophyll-a observations and vegetation coverage. Part of ReSTEK (Brug af Remote Sensing teknologier til opgørelse af klorofylkoncentrationer og vegetationsudbredelse i danske kystvande) and DCE Remote sensing in coastal area projects. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 47 pp. - Technical Report from DCE – Danish Centre for Environment and Energy No. 112. <http://dce2.au.dk/pub/TR112.pdf>

Jakobsen, H.H., J. Carstensen, J.H. Andersen & C. Murray (2021): FerryBox: Perspektiver og anvendelighed i overvågningen af havmiljøet. Notat fra DCE, 20 sider. https://dce.au.dk/fileadmin/dce.au.dk/Udgivelser/Notater_2022/N2022_34.pdf

Jakobsen, H.H. & S. Markager (2018): Overvågning af klorofyl og næringsstoffer i Nordsøen. Status primo 2018. Fagligt notat fra DCE, 11 pp. https://dce.au.dk/fileadmin/dce.au.dk/Udgivelser/Notater_2018/Overvaagning_af_chl_og_vandkemi_i_Nordsoeen_final.pdf

Lansø, A.S., J. Bendtsen, J.H. Christensen, L.S. Sørensen, H. Chen, H.a.J. Meijer & C. Geels (2015): Sensitivity of the air–sea CO₂ exchange in the Baltic Sea and Danish inner waters to atmospheric short-term variability. Biogeosciences 12(9): 2753-2772. <https://doi.org/10.5194/bg-12-2753-2015>.

Lips, I., N. Ruenk, V. Kikas, A. Meerits & U. Lips (2014): High-resolution dynamics of the spring bloom in the Gulf of Finland of the Baltic Sea. J. Mar. Syst. 129: 135-149 <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2013.06.002>

Lusher, A., C. Singdahl-Larsen, P.F. Jaccard, B. van Bavel, L. Valestrand, E.T. Harvey & J.H. Andersen (2021): Frequent sampling of microplastic particles in surface waters in the open parts of the Kattegat and Great Belt, Denmark. NIVA Denmark report. 23 pp. <https://hdl.handle.net/11250/2735983>

- Marrec, P., T. Cariou, M. Latimier, E. Mace, P. Morin, M. Vernet & Y. Bozec (2014): Spatio-temporal dynamics of biogeochemical processes and air-sea CO₂ fluxes in the Western English Channel based on two years of FerryBox deployment. *J. Mar. Syst.* 140:26-38.
<https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2014.05.010>
- Omar, A. M., H. Thomas, A. Olsen, M. Becker, I. Skjelvan, & G. Reverdin (2019): Trends of ocean acidification and pCO₂ in the northern North Sea, 2003–2015. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 124, 3088–3103. <https://doi.org/10.1029/2018JG004992>
- Petersen, W., F. Colijn, D. Hyde & F. Schroede (2005): FerryBox: From Online Oceanographic Observations to Environmental Information. Rapport fra EU Project FerryBox 2002–2005. www.ferrybox.org
- Richardson K., A.W. Visser & F.B. Pedersen (2000): Subsurface phytoplankton blooms fuel pelagic production in the North Sea. *J. Plank. Res.* 22:1663-1671 <https://doi.org/10.1093/plankt/22.9.1663>
- Salt, L.A., H. Thomas, F. Prowe, A.V. Borges, Y. Bozec & H.J.W. Baar (2013): Variability of North Sea pH and CO₂ in response to North Atlantic Oscillation forcing *JGR: Atmospheres* 118(4), 1584-1592.
<https://doi.org/10.1002/2013JG002306>
- Schneider B., W. Gulzow, B. Sadkowiak & G. Rehder (2014): Detecting sinks and sources of CO₂ and CH₄ by ferrybox-based measurements in the Baltic Sea: Three case studies. *J. Mar. Syst.* 140:13-25
<https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2014.03.014>
- Stæhr, P.A., G.B. Groom, D. Krause-Jensen, L.B. Hansen, S. Huber, L.Ø. Jensen, M.B. Rasmussen, S. Upadhyay & S.B. Ørberg (2019): Use of remote sensing technologies for monitoring chlorophyll a and submerged aquatic vegetation in Danish coastal waters. Part of the RESTEK project. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 62 pp. Technical Report No. 139.
<http://dce2.au.dk/pub/TR139.pdf>
- Sørensen, K., W. Eichrem, L. Valestrand, T. Kristiansen & M. Norli (2020): Årsovervåkning med Ferry-Box – Indre Oslofjord 2019 – Datarapport. Rapport fra NIVA, 16 sider + bilag.
<https://niva.brage.unit.no/niva-xmlui/handle/11250/2654920>
- Thyssen M., S. Alvain, A. Lefebvre, D. Dessailly, M. Rijkeboer, N. Guiselin, V. Creach & L.F. Artigas (2015): High-resolution analysis of a North Sea phytoplankton community structure based on in situ flow cytometry observations and potential implication for remote sensing. *Biogeosciences* 12:4051-4066 <https://doi.org/10.5194/bg-12-4051-2015>
- Turner Designs (2004): SCUFA User's Manual Rev.2.3. Turner Designs, Sunnyvale, CA
<http://docs.turnerdesigns.com/t2/doc/manuals/998-2002.pdf>
- Volent, Z., G. Johnsen, E.K. Hovland, A. Folkestad, L.M. Olsen, K. Tangen & K. Sorensen (2011): Improved monitoring of phytoplankton bloom dynamics in a Norwegian fjord by integrating satellite data, pigment analysis, and Ferrybox data with a coastal observation network. *J. Appl. Remote Sens.* 5. <https://doi.org/10.1117/1.3658032>

Bilag 1

FerryBox: Perspektiver og anvendelighed i overvågningen af havmiljøet

Fagligt notat fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

Dato: 05 April 2022 | **34**



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

Datablad

Fagligt notat fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

Kategori: Rådgivningsnotat

Titel: FerryBox: Perspektiver og anvendelighed i overvågningen af havmiljøet

Forfattere: Hans Jakobsen, Jacob Carstensen, Ciarán Murray, Jesper H. Andersen

Institutioner: Aarhus Universitet og NIVA Danmark

Faglig kommentering: Christian Lønborg

Kvalitetssikring, DCE: Anja Skjoldborg Hansen

Sproglig kvalitetssikring: Anne Mette Poulsen

Ekstern kommentering: Miljøstyrelsen. Kommentarerne findes her:
http://dce2.au.dk/pub/komm/N2021_xxx_komm.pdf

Rekvirent: Miljøstyrelsen gennem en bevilling til NIVA Danmark.

Bedes citeret: Jakobsen H, Carstensen J, Murray, D, Andersen J. H. 2022. FerryBox: Perspektiver og anvendelighed i overvågningen af havmiljøet. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 21 s. – Fagligt notat nr. 2022|34
https://dce.au.dk/fileadmin/dce.au.dk/Udgivelser/Notater_2022/N2022_34.pdf

Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse

Foto forside: Indvendig FerryBox med diverse sensorer. Foto: Kai Sørensen.

Sideantal: 20

Indhold

1	Forord	4
2	Introduktion	5
3	Styrker og udfordringer	8
4	Sensorer og datatyper samt deres anvendelighed	9
5	Anvendelse og perspektiver	14
6	Afsluttende bemærkninger	17
7	Referencer	18

1 Forord

Dette notat er udfærdiget af Aarhus Universitet, Institut for Ecoscience, og NIVA Danmark. Projektet er finansieret af Miljøstyrelsen gennem et projekt tildelt NIVA Danmark, som har sigtet på at klarlægge anvendelsesmulighederne af NIVAs eksisterende FerryBox-systemer (FB) i overvågning af de danske farvande. AU er underleverandør på en del af projektet, herunder dette notat. Formålet med dette notat er alene at danne et overblik over resultater opnået i andre lande ud fra den eksisterende litteratur med henblik på at komplementere den eksisterende miljøovervågning.

Fokus i rapporten er på at beskrive den aktuelle og mulige fremtidige brug af FB-data i overvågningssammenhæng samt inkludere forskningsstudier, hvor metoderne kunne tænkes at føde ind i overvågningsprogrammer. Dette inkluderer eksempler på supplerende analyser (fx næringsstoffer, mikroplastik, anvendelse af flow cytometri, etc.) og kompositprodukter (fx kort baseret på informationer fra flere kilder/overvågningstyper) i danske farvande, og farvandene omkring Danmark.

2 Introduktion

FerryBox-system

Et ferrybox- (FB) system er oftest monteret på et kommercielt skib, typisk færger eller fragtskibe, på en fast rute. Disse skibe betegnes "ships-of-opportunity". FB er typisk udstyret med en række forskellige sensorer, som måler på skibenes vandindtag i en fast dybde mellem 4 og 7 m. Der kan i visse tilfælde også være sensorer monteret på dækket af skibet, der giver referencedata omkring lysindstråling, atmosfærisk CO₂, O₂, osv. Anvendelse af FB-systemer kan øge datatætheden i forhold til dataindsamlinger foretaget af myndighedernes overvågningsskibe. Dette gælder både den rumlige, men også den tidslige opløsning, som stiger markant, da sensorerne måler kontinuert, når skibet sejler. Der angives en typisk prøvetagningsfrekvens på 500 meter (NIVA, pers. komm.). FB-systemets data opsamles centralt på skibet i en central dataenhed og udveksles derefter med en database på land, når skibet er i havn med eksempelvis en lokal WIFI-forbindelse (*figur 1*). Hvis der behov for løbende dataudveksling, kan data også udveksles via en satellitforbindelse under sejlads.

I løbet af de sidste par årtier er der sket en løbende udvikling i FB-teknologien, der i begyndelsen var simple systemer, som alene målte temperatur, salinitet og fluorescens som proxy for klorofyl. De nuværende systemer tilbyder desuden en lang række andre målinger af forskellig karakter, der tilsammen kan samles i et velunderbygget billede af de biologiske og oceanografiske forhold i havoverfladen.

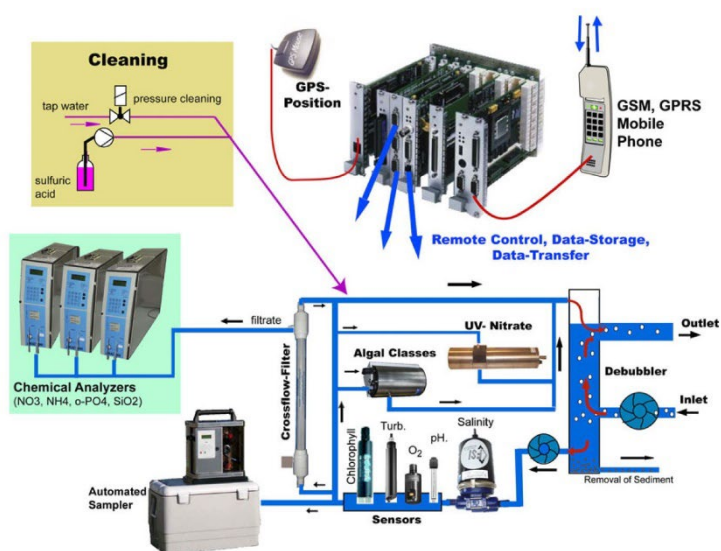
Højfrekvente data kan være ekstremt værdifulde i forskningssammenhænge, og FB har bidraget til en dybere forståelse af lokale biologiske og oceanografiske studier. Derudover kan FB data anvendes i en forvaltningssammenhæng, hvor det kan være nyttigt at følge dynamikken i den fysiske og biologiske oceanografi.

Der kan være flere grunde til at implementere FB i en forvaltningssammenhæng i forhold til at overvåge miljøet. Det kan være et ønske om at følge og beskrive havmiljøets tilstand og behov for at dokumentere effekten af initiativer iværksat for at reducere udvalgte presfaktorer, fx udledninger af næringsstoffer. Det betyder, at FB kan være et nyttigt instrument i forhold til at understøtte flere af havstrategidirektivets deskriptorer, eksempelvis D4 "Food Webs", D5 "Eutrophication" og D7 "Hydrographical conditions". Nogle eksempler på data er indsamling af plastik i havoverflade samt klorofylmålinger. Kravene til data er angivet i EU's GES-beslutning¹, og ved implementeringen af FB er det vigtigt at have fokus på EU's GES-beslutning (Eu, 2017). Dertil kan det være nyttigt at følge og forstå effekten af klimaændringer på havmiljøet over længere skalaer i tid og rum. et kan i praksis være vanskeligt at adskille klimaeffekter og menneskeskabte påvirkninger, men ændringer forårsaget direkte af menneskelig aktivitet vil formodentligt vise sig på en kortere tidsskala end klimaeffekter.

¹ GES : Good Ecological Status

Installation af FB rummer muligheder for indsamling af et bredt spektrum af data (figur 1). Grundlæggende indsamler FB parametrene temperatur, saltholdighed, turbiditet² og klorofyl fluorescens samt en GPS til positionsangivelse. Derudover findes der FB-systemer, som tilbyder yderligere parametre. Disse kan fx være iltkoncentration, pH, pCO₂, algegrupper defineret ud fra gruppespecifik fluorescens, meteorologiske data af lufttryk, atmosfærisk pCO₂, lufttemperatur, vindstyrke og retning. Der findes derudover avancerede systemer monteret med modul til indsamling, opbevaring og eventuel fiksering af vandprøver. Disse prøver kan efterfølgende analyseres kemisk eller ved mikroskopi i laboratoriet, som fx mikroplastik (Bavel *m. fl.*, 2020). Derudover vil disse analyser kunne anvendes som referencedata til kalibrering af satellitdata og sensorerne på FB.

Figur 1. Skematisk oversigt over komponenten i en ferrybox (Petersen *m. fl.*, 2011).

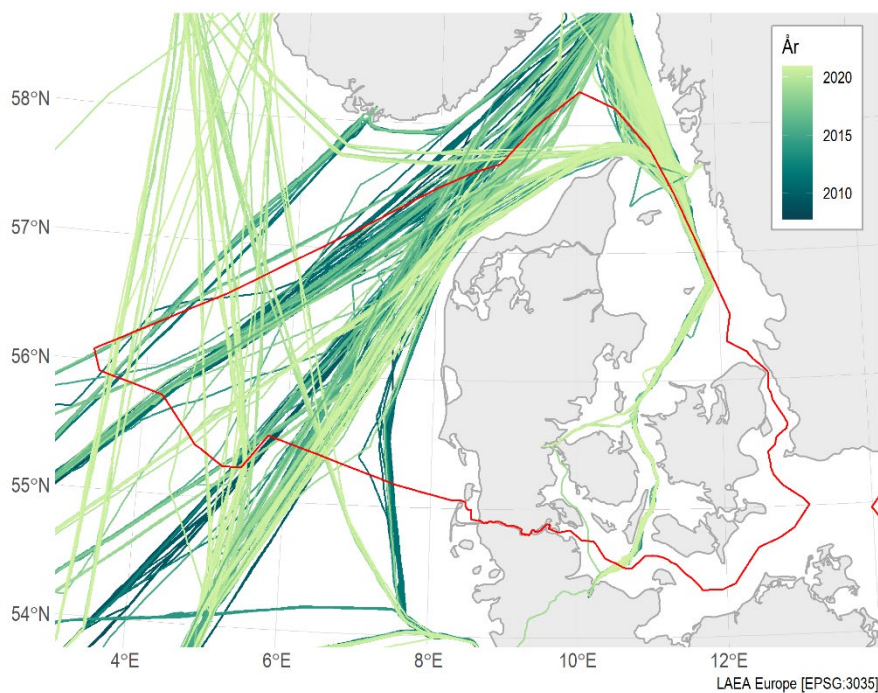


På ruterne gennem Nordsøen (figur 2) indsamles alle ovennævnte parametre undtagen næringsstofanalyser. Lignede parametre indsamles på færgeforbindelsen mellem Oslo og Kiel.

² Turbiditet angiver vandets klarhed. Kilder til øget turbiditet kan være opløst kulstof og suspenderede partikler.

Figur 2. Kort over ruter med FB-systemer installeret, der passerer gennem danske farvande i perioden 2010-2020.

Rutelinjens farve indikerer datoen for sejladsen. Den større spredning af ruter i Nordsøen skyldes at ferryboksene her er installeret på fragtskibe, der skifter rute. Mellem Oslo og Kiel har det samme skib haft fast rute gennem hele perioden, og her er der kun mindre variationer i sejlruten.



3 Styrker og udfordringer

Rumlig opløsning

Målingerne foretages langs skibets rute, og data har langt større horisontal dækning af overfladevandet i forhold til enkeltmålinger, som det kendes fra det danske NOVANA-program. Ulempen ved FB-data er, at data kun indsamles i overfladen, langs en transekt. Omvendt vil gentagne besøg på samme position mindst én gang dagligt give et højopløseligt billede af transektet. Derudover indeholder data ikke information om de dybere vandlag. Det betyder fx at klorofyl maksimum i springlaget, som karakteriserer hovedparten af Nordsøen og store dele af Kattegat (Richardson *m. fl.*, 2000), ikke måles. Derfor kan der ikke beregnes integrerede koncentrationer, som repræsenterer hele vandsøjlen.

Temporal opløsning

Den tidsmæssige opløsning af et FB-transekt er typisk dag til uge, afhængig af sejlplan. FB kan derfor bruges til overvågning af dynamiske havområder, hvor tilstanden ændrer sig hurtigt. Ved indsamling af FB-data over længere tid kan disse data benyttes til at få en bedre forståelse af fx successioner og udviklingstrends i planktonsamfundet. De havområder, hvor der i dag findes FB-data, er dog knap så dynamiske som fx kystområder og fjorde.

Inden anvendelse af FB implementeres, er det vigtigt at forstå, at indsamlingen ikke er det primære formål med skibenes fragtruter, og fragtlinjer oprettes, ændres eller flyttes til andre havområder med risiko for at forstyrre integriteten af de indsamlede data. Der er derfor en vis risiko for, at tidsserier til en vis grad kan blive afbrudt, men dette kan kompenseres ved at anvende flere skibe, der besejler de samme områder.

4 Sensorer og datatyper samt deres anvendelighed

Det giver ikke mening at diskutere de enkelte sensors (parametre) *modus operandi* i detaljer eller specifikke sensorprodukter, da der sker en løbende teknologisk udvikling og forfinelse af sensorerne, der er tilgængelige på markedet. Eksempelvis er "SCUFA" klorofylsensoren fra Turner Designs, som tidligere anvendtes på en del af NIVAs FB, udgået af produktion. Det betyder ikke, at data ikke kan anvendes, men at de nyere sensorer leverer mere robuste og præcise data.

I det følgende gives en kort indføring i sensorernes funktioner, som er nødvendig at kende for at fortolke data. FB-parametrene kan groft opdeles i to typer, nemlig 1) sensorer, der giver information om fysiske og kemiske forhold, og 2) sensorer, der giver informationer om (afledte) biologiske forhold. Begrebet afledte målinger dækker i denne sammenhæng dataprojekter, der beskriver biologisk aktivitet.

Temperatur og salinitet

Temperatur og salinitet er typiske standardmålinger, som følger med alle FB-systemer. Disse målinger kan anvendes til at beregne massefylde af overfladevandet og giver vigtige informationer om havstrømme. Eksempelvis er salinitetsanomalier i havoverfladen anvendelige til præcist at placere positionen af den termiske front og dens dynamik, der deler den vestlige Engelske Kanal mellem Frankrig og Sydengland. Derved kunne de to meget forskellige hydrografiske provinser, der skiller den sæsonbestemte lagdelte vandsøjle i den nordlige del fra den fuldt opblandede vandsøjle i den sydlige del af den vestlige Engelske Kanal, identificeres (Marrec *m. fl.*, 2014).

Turbiditet

Turbiditet er et mål for vandets evne til at absorbere reflektere lys. Det betyder, at data opsamlet nær flodudmundinger kan indeholde varierende mængde opslæmmet materiale. Eksempelvis kan turbiditet bruges i inter-årige analyser af forskelle, der kan sammenholdes med afstrømning fra land og afsløre anomaliteter, der kan skyldes klima eller ændret anvendelse af landområder (Petersen *m. fl.*, 2011).

pCO₂ og O₂

Der er i et overordnet perspektiv tre kulstofpuljer på jorden: atmosfæren, det terrestriske økosystem samt oceanerne. Derudover er der puljer af kulstof lagret som kul og oliereserver. I oceanerne er den vigtigste kulstofpulje i uorganisk form opløst og dissociert CO₂ og udgør 98 % af den samlede mængde. De resterende 2 % består primært af organisk kulstof, og heraf er en meget lille fraktion bakterier, alger osv. (Baltar *m. fl.*, 2021).

Der foregår en løbende diskussion om oceanernes evne til at optage/opløse og frigive CO₂ fra den øgede afbrænding af fossile kulstofkilder, som har medført en kraftig stigende CO₂-koncentration i atmosfæren siden industrialiseringens begyndelse (Sabine *m. fl.*, 2004, Sabine & Tanhua, 2010). FB-data med information om pCO₂ kan derved bidrage til forståelse af vandsøjle

evne til at absorbere stigende CO₂-niveauer. Det skal noteres, at ændringer i CO₂-niveauer forgår over meget lange tidsskalaer og vil kræve årtiers FB-målinger for at give mening. Det er blevet foreslået at bruge O₂-mætning som et mål for primærproduktion, så undermætning udtrykker respiration (heterotrofe processer), mens overmætning indiker dominans af primærproduktion. Derved kan en simpel massebalanceberegning bruges til at vurdere inter-årige forskelle i kulstofflux (Petersen *m. fl.*, 2011).

pH

pH er et mål for vandets surhed (H⁺-ioner) og styres af havets syre-base-processer samt alkalinitet, som er havets buffer til at neutralisere syre. Havets pH bestemmes overordnet af to forhold: 1) udveksling med atmosfærens CO₂, der dissocierer med havvand under dannelse af frie H⁺-ioner, hvilket sænker pH, og 2) balancen mellem primærproduktionen, der i den aktive fotoperiode presser pH opad under fiksering af CO₂ og frigivelse af O₂, og respiration (forbrug af O₂), som presser pH nedad ved frigivelse af CO₂. Det betyder, at områder med høj primærproduktivitet oplever stort optag af CO₂ og frigivelse af O₂ i fotoperioden mellem solopgang og solnedgang, mens natrespirationen driver pH nedad, når der ikke er fotosyntese. Grundet den langsomme udveksling af CO₂ med atmosfæren vil dynamikken i pH i produktive områder ofte være styret af balancen mellem produktion og respiration, og pH kan derfor fortolkes som et indirekte mål for primærproduktion. Variationerne i pH er typisk størst i overfladevandet i områder med høj nitratbelastning midt på dagen under sollys, hvorimod dynamikken i bundvandets pH er langsommere (Carstensen *m. fl.*, 2021). Der monitoreres regelmæssigt for pH i danske farvande med konventionelle målinger med elektroder (Hansen & Hoegslund, 2019), og lignende programmer findes andre steder på kloden (Carstensen & Duarte, 2019).

I Norge har myndighederne implementeret et intensivt måleprogram, hvor en stor del af målingerne er foretaget med FB (Jones *m. fl.*, 2020). Store dele af det norske område af Nordatlanten overvåges på denne måde, og resultaterne peger på, at FB kan levere data til at forstå ændringer i havets pH, både sæsonvariationer og langtidsændringer.

Fluorescens

Fluorescensmålinger er en familie af målinger, der giver information om biologisk aktivitet. Der vil typisk være en "klorofyl-sensor" på FB, der opfanger fluorescens i det synlige område som en proxy for klorofyl. Andre sensorer måler et bredt område af kulstofforbindelser af biologisk oprindelse, der fluorescerer i det ultraviolette område.

Planter, og dermed også alger, er karakteriseret af pigmentet klorofyl, der opfanger lysenergi i det synlige område 400-700 nm. På tværs af algeklasser er der ud over klorofyl-klassespecifikke pigmenter med anderledes fluorescerende egenskaber.

En fluorescenssensor i en FB fungerer generelt ved, at monokromatisk³ lys belyser fx en alge, der afgiver lys, "fluorescerer", når lysenergien optages i kloroplasten, og efterfølgende emitteres. Det betyder, at der kan anvendes flere monokromatiske lyskilder med forskellige bølgelængder i en sensor, der måler fluorescens ved forskellige bølgelængder og derved giver information om algeklasser.

Typisk vil FB som minimum måle klorofyl. I en udbygget version har NIVA et flerkanals fluorometer fra bbe Moldanke med mulighed for at måle fluorescens over et bredt spektrum fra UV-lys (370 nm) til gult lys ved 570 nm. Det betyder, at der ved hjælp af avancerede algoritmer kan udarbejdes en klasseopdeling af alger baseret på deres specifikke pigmentsammensætning (Beutler *m. fl.*, 2002).

FB monteret med en bbe Moldanke fluoroprobe kan adskille rekylalger (Cryptophyceae), grønalger (Chlorophyceae), blågrønalger (Cyanophyceae) samt den resterende gruppe. Det hævdes ofte at bbe Moldanke fluoroprobe kan identificere forskellige algeklasser fra den "brune gruppe", dvs. adskille kiselalger (Bacillariophyceae), furealger (Dinophyceae) og prymnesiofytter (Prymnesiophyceae) fra hverandre. Det er en uheldig misforståelse, da disse grupper ikke har fluorescerende pigment, der tillader adskillelse (Beutler *m. fl.*, 2002), og alle tre klasser fra den brune gruppe er periodisk dominerende i den marine vandsøjle. Der findes dog enkelte eksempler, hvor det er lykkedes at opdele denne gruppe i klasser vha. fluorescens. Det ene publicerede studie, der er bekendt af forfattergruppen, er fluorescensmålingerne understøttet af parallelle mikroskoptællinger (Houliez *m. fl.*, 2012), hvilket reducerer fordele ved automatiske analyser betragteligt.

Klorofyl er et komplekst molekyle, der typisk bestemmes kemisk præcist med HPLC⁴. En generel udfordring er, at fluorescens normaliseret til klorofyl ikke er konstant over døgnet. Dette fænomen er generelt for klorofyl i alle planter bestemt med fluorescens og betegnes i litteraturen som lysmætning eller lys-hæmning (Platt *m. fl.*, 1980). Det betyder, at samme mængde klorofyl afgiver varierende fluorescens afhængig af solens højde samt den dybde, der måles i. Dette skyldes, at pigmenterne kan være mættet med lys, og yderligere øgning af lys vil derfor ikke resultere i forøget fluorescens, og signalet målt med fluorescenssensoren vil derfor være uændret. Det optimale tidspunkt på døgnet, hvor det mest præcise fluorescenssignal findes, er mellem solnedgang og solopgang. Det kan derfor være nødvendigt - og formodentligt også muligt - at udvikle algoritmer, der kompenserer for lysmætning, så fluorescens målt ved midnat er sammenlignelig med fluorescensmålinger foretaget, når solen står i zenit.

Fluorescensen kan også anvendes uden for det synlige område (400-700 nm) og derved udnyttes, at en række opløste kulstoffer fluorescerer ved ultraviolet (UV) belysning. Opløst organisk kulstof (CDOM) i oceanet har forskellige optiske karakteristika, der afhænger af historik og oprindelig kilde. Eksempelvis har afstrømninger fra land et karakteristisk fingeraftryk af det opland, hvor

³ Monokromatisk er defineret som lys med en smal veldefineret bølgelængde. Eksempelvis afgiver klorofyl a og b grønt lys ved en bølgelængde på ~470 nm.

⁴ HPLC: High Performance Liquid Chromatography. Kromatografisk metode til at analysere for kemiske stoffer med meget høj følsomhed og præcision.

afstrømningen stammer fra. I en FB-applikation kan fluorescens derfor anvendes til at skelne vandområder påvirket af forskellig terrestrisk afstrømning, men også til at adskille vandmasser med forskellig oprindelse, fx vand fra Østersøen versus Nordsøen (Stedmon *m. fl.*, 2010).

Fremadrettet udvikles der nye og mere præcise teknikker, som over tid kan erstatte fluorescensmålinger til bestemmelse af klorofyl. Et eksempel er "Flow-through PSICAM" (PSICAM)⁵, som har vist lovende resultater (Wollschläger *m. fl.*, 2013), selvom det angives, at der er behov for yderligere udvikling, før teknologien er fuldt operationel (Eurogoos).

Indsamling af diskrete prøver

Som supplement til de kontinuerte målinger med sensorer kan der indsamles prøver med forholdsvis høj rumlig opløsning langs FB-ruten. Der kan f.eks. indsamles diskrete prøver langs med transektet, der muliggør bestemmelser af næringssalte (Lips *m.fl.* 2014). Samme fremgangsmåde kunne implementeres til indsamling af prøver til undersøgelser af planktonsamfundet under mikroskop og som reference for eksempelvis til kalibrering af sensorer. I en anden undersøgelse er der udviklet en metode til indsamling af større volumener filtreret over fintmaskede net, hvilket har gjort det muligt at kortlægge koncentrationer af mikroplastik med FB (Bavel *m. fl.*, 2020).

Datakvalitet / kvalitetssikring

EuroGOOS⁶ har etableret en arbejdsgruppe, der fungerer som platform for udveksling af viden inden for FB. Her findes en kort liste over nuværende teknologiers formåen, og standardsensorerne for salinitet, temperatur og O₂ angives som operationelle og anvendelige uden yderligere udvikling. De øvrige sensorer, der er behandlet i denne rapport, beskrives som delvist operationelle, men med behov for "major improvements" (Eurogoos).

Drift i sensorerne. Data fra FB-systemer leverer kontinuerte observationer med høj frekvens. Derfor er løbende kalibrering og validering afgørende for at sikre pålidelige data. Diskrete vandprøver kan indsamles vha. automatisk prøveindsamlere, som gemmer en vandprøve til efterfølgende analyse i laboratoriet, og eventuelt kalibrering af sensorer. Alternativt kalibreres sensorernes parametre periodisk ved havnearløb efter intervaller afstemt for hver sensortype. Det er vigtigt, at der løbende føres logbog over kalibreringen samt

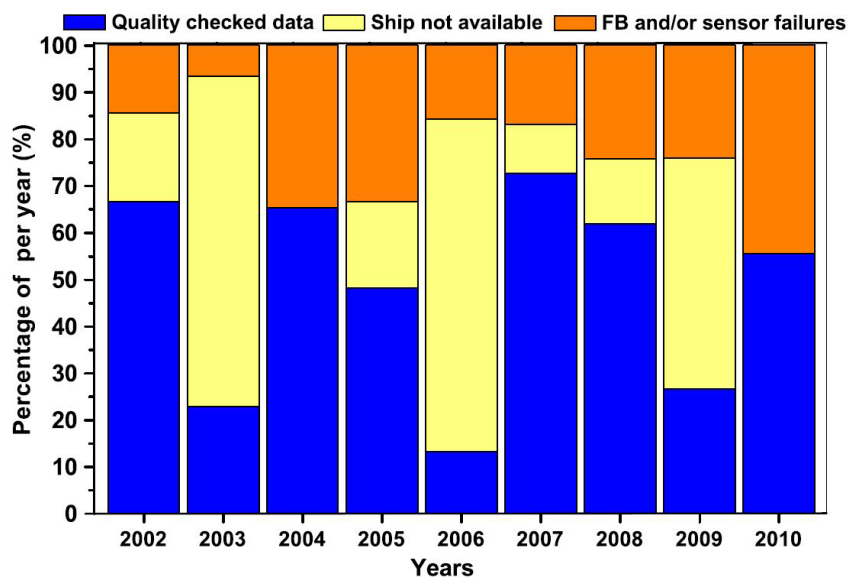
⁵ PSICAM = Point-Source Integrating Cavity Absorption Meter. PSICAM er et spektrofotometrisk instrument der måler absorption. I modsætning til klassiske spektrofotometre bruger PSICAM en diffus lyskilde, som er placeret i midten af den integrerende kugle (Cavity). Sensoren måler gennem en åbning i siden af kuglen, og detektoren opsamler diffust lys. I modsætning måler et klassisk spektrofotometer retningsbestemt lysabsorption gennem en cuvette. PSICAM har høj følsomhed på grund af sin lange optiske vej og kan derfor bruges til at undersøge lave absorptionsværdier. Det betyder, at PSICAM har en meget høj følsomhed og derfor kan bestemme meget lave CDOM- og klorofylkoncentrationer.

⁶ <https://eurogoos.eu/>

eventuelle afvigelser, der er opstået som følge af drift i sensorerne mellem kalibreringen, for efterfølgende at kunne korrigere målingerne.

Det betyder, at når sensorer udskiftes pga. nedbrud eller erstattes af nye og mere moderne sensortyper, skal det sikres, at der sker en omhyggelig udfasning og indkøring, fx ved løbende parallelle målinger sammenholdt med kalibreringsdata. Derved sikres, at data fra sensorerne er sammenlignelige, og at en konsistent tidsserie kan bevares.

Figur 3. Fordeling mellem kvalitetstjekkede data (blå) og ikke-anvendelige data. Gul angiver manglende sejllads, og orange angiver sensorfejl (Petersen *m. fl.*, 2011).



Andre fejlkilder: I en undersøgelse, hvor stabiliteten af standardparametrene salinitet og temperatur blev undersøgt, var 50 % af data typisk til rådighed i forhold til den planlagte FB-indsamling. Fravær af sejllads og fejl på sensoren blev angivet som årsagerne (*figur 3*). Nyere studier rapporterer om langt mindre tab af data på omkring 9 % (Marrec *m. fl.*, 2014), og dette kan skyldes, at forbedret erfaringsgrundlag og modning af teknologier har spillet en væsentlig rolle. For andre sensorer er driftssikkerheden ikke opgjort, men det antages, at driftsstabiliteten er stigende med teknologiens modenhed og alder.

5 Anvendelse og perspektiver

Komposit-produkter

Styrken ved FB er ikke nødvendigvis målingerne fra de enkelte separate sensorer, men snarere anvendelsen af FB-integrerede dataprodukter, hvor flere datatyper samles i et aggregeret produkt.

Værdien af FB øges derfor betydelig, hvis FB kan kombineres med andre data. I en undersøgelse fra Den Finske Bugt blev FB anvendt sammen med data fra bøjestationer og satellitter. Derved kunne forskerne undersøge de fysiske oceanografiske processer i meget høj opløsning i tid og rum, og dermed demonstrere, hvordan vandmasser opblandes vertikalt (Lips *m. fl.*, 2016).

Kombinationen af FB, data fra satellitter og prøvetagning fra undersøgelses-skib kan bruges til at opdage og overvåge fytoplanktonopblomstringer i tid og rum. Fluorescens, omregnet til klorofyl, og turbiditet fra FB og tilsvarende satellitprodukter blev fx sammenholdt med artsbestemmelser fra diskrete prøvetagninger, og derved kunne der opnås en detaljeret forståelse af nøglearten *Emiliana huxleyi* i Nordatlanten/norske fjorde (Volent *m. fl.*, 2011).

I et andet studie kombineres FB med data fra satellitter i et område i Østersøen. I den centrale del af Østersøen er årligt tilbagevendende opblomstringer af blågrønalger et stort problem. Blågrønalgerne samler sig i overfladen om sommeren og giver anledning til ekstremt høje klorofylværdier fra satellitterne. I undersøgelsen kunne klorofyl fra FB anvendes sammen med satellit-data til at frasortere (kvalitetssikre) ekstreme værdier, der forstyrrede satellitbestemt klorofyl (Groetsch *m. fl.*, 2014)

I et tredje eksempel på brug af integrerede data *kunne* FB kombineret med flow-cytometri i et forskningsprojekt forklare anormalitet i satellitters reflektants som funktion af cellestørrelser og algeopblomstringer (Thyssen *m. fl.*, 2015).

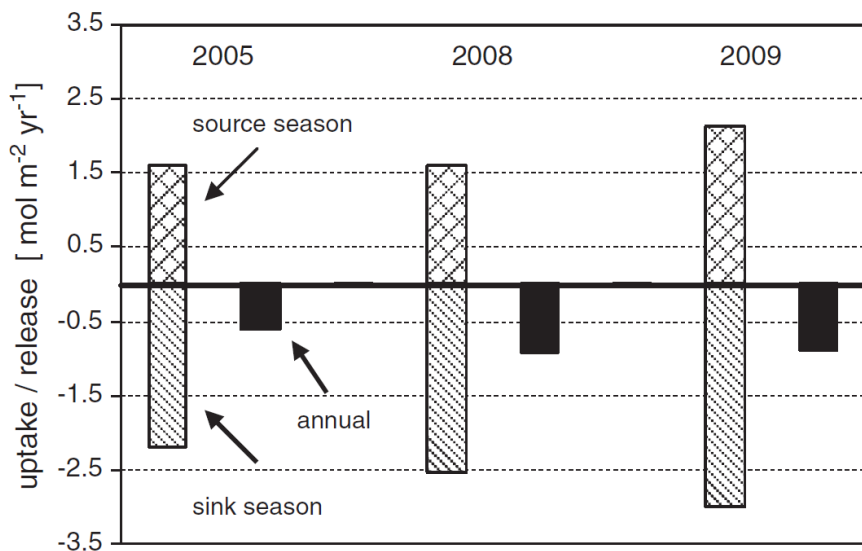
Der er flere studier, der peger på anvendeligheden af FB til at identificere lokale havområder af særlig betydning i forhold til den biologiske pumpe⁷ (Petersen *m. fl.*, 2011, Schneider *m. fl.*, 2014) eller områder, der har en særlig funktion, fx havområder påvirket af vinddrevene upwellings⁸ (Kikas & Lips, 2016).

I en undersøgelse af CO₂-målinger over flere sæsoner konkluderede Schneider *et al.* (2014), at den biologiske pumpe i den centrale del af Østersøen overordnet fjernede CO₂ fra vandsøjlen og begravede det som organisk kulstof i sedimentet (netto-optag) (figur 4). I et lignende studie kunne Marrec *et al.* (2014) vise, at noget tilsvarende gør sig gældende i de fleste havområder langs kontinentalsoklen.

⁷ Den biologiske pumpe dækker over havets evne til at fiksere CO₂ fra atmosfæren og vha. biologiske processer lagre organisk kulstof i dybhavet eller havbunden.

⁸ Upwelling betyder i en oceanografisk sammenhæng, at der føres vandmasser fra dybere lag til overfladen. Dette kan have en betydning i forbindelse med tilførsel af næringssalte til overfladens fotiske zone, hvor de stimulerer algevækst.

Figur 4. Eksempel på kulstofbudget for tre år i Østersøen. Det undersøgte område afgiver CO₂ på visse tidspunkter – "source season" – og fjerner CO₂ i en anden del af sæsonen – "sink season". Nettoforskellen er vist med sort (Schneider *m. fl.*, 2014).



Det betyder, at pCO₂-målinger er relevante i kystnære områder og kan anvendes i en forvaltningsammenhæng med information om ændringer af primærproduktionen.

Studiet af Schneider *et al.* (2014) er interessant, da det forsøger at anvende data i en syntese med henblik på at forstå det undersøgte havområdes evne til at optage CO₂. Det findes flere andre studier, der beskriver dynamikken i havets CO₂-koncentration i forhold til atmosfæren (Omar *m. fl.*, 2009), og det er bl.a. vist, at marginale/kystnære havområder er i stand til at fjerne kulstof fra overfladen med en højere rate end i de åbne oceaniske havområder (Sabine & Tanhua, 2010).

Det vil derfor være oplagt at anvende FB til mere komplekse overvågningsformål. En udfordring er fx bestemmelse af netto(primær)produktion. For nuværende foregår dette i det danske NOVANA-program med korttidsinkubationer med radioaktivt mærket kulstof (¹⁴C-metoden). ¹⁴C-metoden kritiseres for at have svært ved at adskille brutto- og nettoproduktion og for kun at bestemme produktionen, når lyset er optimalt.

I en undersøgelse målt atmosfærisk CO₂ kontinuerligt langs et transekt i Mecklenburgbugten på et ship-of-opportunity (Schneider *m. fl.*, 2015). Data blev anvendt til at forstå gasudvekslingen mellem atmosfære og havoverflade og blev fortolket i lyset af primærproduktion. Eksempelvis blev forårsopblomstringen identificeret ved årets første kontinuerlige fald i pCO₂ til under atmosfæreniveau, og det strakte sig typisk fra midten af februar til midten af marts. Undersøgelsen kunne også vise, at nettoproduktionen over en tiårsperiode steg med 80 %. Der er der derfor mulighed for at fortsætte udviklingen af denne typer analyser. Der er fx udviklet metoder til at undersøge stofomsætningen i søer (Winslow *m. fl.*, 2016), som muligvis kan adapteres til at udtrykke et mål for primærproduktionen (bruttoproduktionen) samt nettoproduktionen i overfladen. Denne type integrerende indikatorer kunne fremadrettet inkludere målinger af pH og O₂ og vil kunne sammenholdes med fx klorofylmålinger og CO₂-balancen og give et højopløseligt billede af produktionsforholdene.

Derved kan der dannes et detaljeret billede af produktionsforholdene i overfladen. Denne type data kan være vigtige fremadrettet som bidrag til havstrategiens pelagiske deskriptorer (D1C6)⁹ og D4 "Food webs", hvor der har været arbejdet med en indikator for primærproduktion.

Omkostninger

Anskaffelsesomkostningen til en FB varierer efter, hvilket system der vælges, og hvilke sensorer den konfigureres med. En typisk anskaffelsespris er angivet til 115.300 EUR (Eurogoos, 2017). Udgiften til driften af FB er belyst i en spørgeskemaundersøgelse, hvor spørgeskemaer blev sendt til forskellige operatører af FB tilknyttet EU JERICO-projektet. Her blev den gennemsnitlige årlige drift af FB angivet til 90.500 EUR, hvoraf løndelen udgør 55 %. EuroGOOS (2017) peger på, at løndelen er delt ud på en række tekniske og videnskabelige kompetencer, og det er derfor nødvendigt at have en veludviklet infrastruktur til rådighed, bestående af ingeniører og teknikere, til at vedligeholde systemet.

Det skal i forlængelse af ovenstående bemærkes, at der allerede er investeret store summer i FB-systemer, som i dag er i operationel drift på færger mv., der regelmæssigt sejler gennem de danske farvande, fx Oslo-Kiel-færgen.

⁹ Indikator under deskriptor D1, der dækker "habitattypens tilstand, herunder dens biotiske og abiotiske struktur og dens funktioner (fx dens typiske artssammensætning og deres relative tæthed, fravær af særligt sensitive eller sårbare arter eller arter, som har en vigtig funktion i økosystemet, eller arters størrelsesstruktur), påvirkes ikke negativt af menneskeskabte belastninger" (EU, 2017).

6 Afsluttende bemærkninger

Hvis det på et tidspunkt besluttes at implementere FB i en eller anden form til at understøtte overvågningen af miljøforholdene i de åbne dele af de danske farvande, er det vigtigt at acceptere, at periodevise målinger er utilstrækkelige til at give et samlet billede af områdets miljøtilstand. Det kræver kontinuerede data, der tilsammen kan danne en længere tidsserie. Det fælleseuropæiske EuroGOOS FerryBox-projekt angiver, hvilke transekter der er aktive, og hvorfra der kan indhentes data (https://ferrydata.hzg.de/index.cgi?seite=passage_plot_plotly). Heraf fremgår det, at der for nuværende (primo 2022) er en enkelt aktiv transekt i Nordsøen, der går fra Esbjerg til Immingham. Det kan være en udfordring at sikre kontinuerede data for et givent havområde som fx Nordsøen, og for at sikre anvendeligheden bør de kompetente myndigheder sikre, at driften af FB-systemet fastholdes over en længere årrække for at indsamle tilstrækkelige mængder data til, at de kan bidrage med information om udviklingen i havets miljøtilstand.

Hvis man ønsker at anvende resultater indsamlet med FB i en overvågnings- eller forvaltningssammenhæng, er det vigtigt, at der er international enighed mellem landene. Dette kan være en udfordring, da FB tager prøver i dybden af skibets stævnør (~5 m). EU's GES-beslutning (EU, 2017) angiver fx, at klorofyl (D5C2) skal indsamles integreret for hele vandsøjlen, samt at mikroplastik (D10C2) skal indsamles i havoverfladen. Det kan have den konsekvens, at data, der ikke opfylder kravene i GES-beslutningen, risikerer at blive "flaget" (eller i visse tilfælde afvist) i de miljøtilstandsvurderinger, som fx HELCOM (HOLAS III), OSPAR (QSR23) og EEA (Marine Messages III) udarbejder. Det er derfor afgørende, at en myndighed, der beslutter sig for at anvende FB, sikrer sig, at data kan anvendes i fremtidige indberetninger og vurderinger af miljøtilstanden. I andre tilfælde er udviklingen af indikatorer inden for EU's havstrategi (MSFD) stadig så umodne, at det kan være attraktivt at undersøge anvendelsen af FB-data i udviklingsarbejdet af indikatorer med tilhørende operationelle GES-værdier.

Dertil skal der afsættes løbende ressourcer til bearbejdning af data, hvilket bør medtages i budgetterne, da der kan være større omkostninger forbundet med kvalitetssikring af FB-data i forsknings- og forvaltningsprojekter foruden udvikling af algoritmer til at omsætte disse højfrekvente data til relevant information i overvågnings- eller forvaltningssammenhæng. FB producerer meget store datamængder, og den løbende udskiftning og opgradering af sensorer rummer en risiko for, at datamængden og manglende konsistens i tidsserier vokser til et omfang, der kan være vanskeligt at håndtere. For at minimere risikoen for, at et FB-projekt lider "datadøden", er det afgørende, at de nødvendige ressourcer afsættes til kvalitetssikring, kalibrering, oparbejdning, kompilering og anvendelse af data.

7 Referencer

Baltar F, Alvarez-Salgado XA, Arístegui J, Benner R, Hansell DA, Herndl GJ, Lønborg C (2021) What is refractory organic matter in the ocean? *Front Mar Sci* (8) 327

Bavel BV, Lusher AL, Jaccard PF, Pakhomova S, Singdahl-Larsen C, Andersen JH, Murray C (2020) Monitoring of microplastics in Danish marine waters using the Oslo-Kiel ferry as a ship-of-opportunity. NIVA Danmark. Rapport no 7524-2020 s. 34

Beutler M, Wiltshire KH, Meyer B, Moldaenke C, Luring C, Meyerhofer M, Hansen UP, Dau H (2002) A fluorometric method for the differentiation of algal populations *in vivo* and *in situ*. *Photosynth Res* 72:39-53

Carstensen J, Duarte CM (2019) Drivers of pH Variability in Coastal Ecosystems. *Environ Sci Technol* 53:4020-4029

Carstensen J, N.R. A, Christensen J, Mohn C (2021) Havets pH-balance påvirkning fra klima og næringsstoffer. Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, Book 429, Aarhus

EU (2017) Kommissionens afgørelse (EU) 2017/848 af 17. maj 2017 om fastlæggelse af kriterier og metodiske standarder for god miljøtilstand i havområder samt specifikationer og standardmetoder for overvågning og vurdering og om ophævelse af afgørelse 2010/477/EU. Book L 125/43

EuroGOOS <https://www.ferrybox.com/index.php.en>. Accessed Nov. 2021

EuroGOOS (2017) Ferrybox whitebook (https://eurogoos.eu/download/publications/EuroGOOS_Ferrybox_whitepaper_2017.pdf)

Groetsch PMM, Simis SGH, Eleveld MA, Peters SWM (2014) Cyanobacterial bloom detection based on coherence between ferrybox observations. *J Mar Syst* 140:50-58

Hansen JW, Høgslund S (2019) Marine områder 2018 NOVANA. In: Hansen JW, Hoegslund S (eds) (*In Danish language*) Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, Aarhus

Houliez E, Lizon F, Thyssen M, Artigas LF, Schmitt FG (2012) Spectral fluorometric characterization of Haptophyte dynamics using the FluoroProbe: an application in the eastern English Channel for monitoring *Phaeocystis globosa*. *J Plank Res* 34:136-151

Jones EM, Chierici I, Skjelvan MN, Norli H, Frigstad KY, Børsheim HH, Lødemel T, Kutti AL, King K, Sørensen SK, Lauvset K, Jackson-Misje LB, Apelthun T, de Lange T, Johannessen C, Mourgues C, Bellerby R (2020) Monitoring ocean acidification in Norwegian seas in 2019. Book M-1735. Miljødirektoratet

Kikas V, Lips U (2016) Upwelling characteristics in the Gulf of Finland (Baltic Sea) as revealed by Ferrybox measurements in 2007-2013. *Ocean Sci* 12:843-859

- Lips I, Ruenk N, Kikas V, Meerits A, Lips U (2014). High-resolution dynamics of the spring bloom in the Gulf of Finland of the Baltic Sea. *J Mar Syst* 129: 135-149
- Lips U, Kikas V, Liblik T, Lips I (2016) Multi-sensor in situ observations to resolve the sub-mesoscale features in the stratified Gulf of Finland, Baltic Sea. *Ocean Sci* 12:715-732
- Marrec P, Cariou T, Latimier M, Mace E, Morin P, Vernet M, Bozec Y (2014) Spatio-temporal dynamics of biogeochemical processes and air-sea CO₂ fluxes in the Western English Channel based on two years of FerryBox deployment. *J Mar Syst* 140:26-38
- Omar AM, Olsen A, Johannesen T, Hoppema M, Thomas H, Borges FM (2009) Spatiotemporal variations of fCO₂ in the North Sea. *Ocean Sci* 6:13
- Petersen W, Schroeder F, Bockelmann FD (2011) FerryBox - Application of continuous water quality observations along transects in the North Sea. *Ocean Dynam* 61:1541-1554
- Platt T, Gallegos CL, Harrison WG (1980) Photoinhibition of photosynthesis in natural assemblages of marine phytoplankton. *J Mar Res* 38:687-701
- Richardson K, Visser AW, Pedersen FB (2000) Subsurface phytoplankton blooms fuel pelagic production in the North Sea. *J Plank Res* 22:1663-1671
- Sabine CL, Feely RA, Gruber N, Key RM, Lee K, Bullister JL, Wanninkhof R, Wong CS, Wallace DW, Tilbrook B, Millero FJ, Peng TH, Kozyr A, Ono T, Rios AF (2004) The oceanic sink for anthropogenic CO₂. *Science* 305:367-371
- Sabine CL, Tanhua T (2010) Estimation of anthropogenic CO₂ inventories in the ocean. *Ann Rev Mar Sci* 2:175-198
- Schneider B, Buecker S, Kaitala S, Maunula P, Wasmund N (2015) Characteristics of the spring/summer production in the Mecklenburg Bight (Baltic Sea) as revealed by long-term pCO₂ data. *Oceanologia* 57:375-385
- Schneider B, Gulzow W, Sadkowiak B, Rehder G (2014) Detecting sinks and sources of CO₂ and CH₄ by ferrybox-based measurements in the Baltic Sea: Three case studies. *J Mar Syst* 140:13-25
- Stedmon CA, Osburn CL, Kragh T (2010) Tracing water mass mixing in the Baltic-North Sea transition zone using the optical properties of coloured dissolved organic matter. *Est Coast Shelf Sci* 87:156-162
- Thyssen M, Alvain S, Lefebvre A, Dessailly D, Rijkeboer M, Guiselin N, Creach V, Artigas LF (2015) High-resolution analysis of a North Sea phytoplankton community structure based on in situ flow cytometry observations and potential implication for remote sensing. *Biogeosciences* 12:4051-4066
- Volent Z, Johnsen G, Hovland EK, Folkestad A, Olsen LM, Tangen K, Sorensen K (2011) Improved monitoring of phytoplankton bloom dynamics in a Norwegian fjord by integrating satellite data, pigment analysis, and Ferrybox data with a coastal observation network. *J Appl Remote Sens* 5

Winslow LA, Zwart JA, Batt RD, Dugan HA, Woolway RI, Corman JR, Hanson PC, Read JS (2016) LakeMetabolizer: an R package for estimating lake metabolism from free-water oxygen using diverse statistical models. *Inl Wat* 6:622-636

Wollschläger J, Grunwald M, Röttgers R, Petersen W (2013) Flow-through PSICAM: A new approach for determining water constituent's absorption continuously. *Ocean Dynam* 63

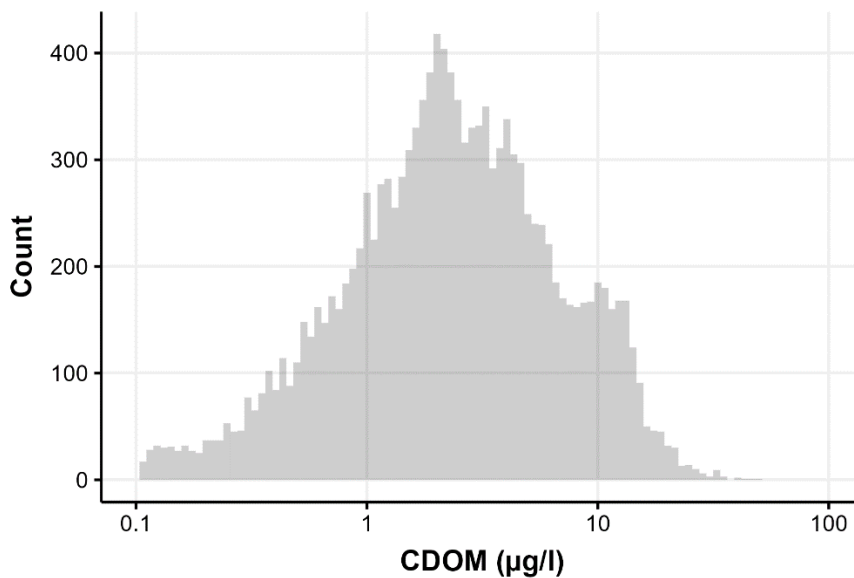
Bilag 2

Fordelingen af CDOM-fluorescens målinger fra Nordsøen

Figur 20 i rapporten viser relationen mellem CDOM-fluorescens og salinitet i FerryBox målinger fra Nordsøen, hvor det kan ses at målingerne fordeler sig i to grupperinger med forskellige gradienter i CDOM-salinitetsrelationen.

Det ses også i figuren, at der er del målinger hvor værdien nærmer sig 0.0 $\mu\text{g/l}$. Det blev derfor undersøgt hvordan værdierne for CDOM-fluorescens fordeler sig. Dette histogram viser fordelingen, som tilnærmer sig en normal fordeling efter log transformation (bemærk log-skala på x-aksen).

Der findes ingen værdier under 0.1 $\mu\text{g/l}$ men heller ingen målinger på præcis 0.1 $\mu\text{g/l}$, som vil indikere en trunkering eller oprunding af værdier mindre end grænseværdien. Det er derfor sandsynligt at værdier under denne grænse er blevet kasseret. At vælge en anden, højere, grænse end 0.1 $\mu\text{g/l}$ vil imidlertid ikke gøre afskæringen mindre tydeligt i **Figur 20**.

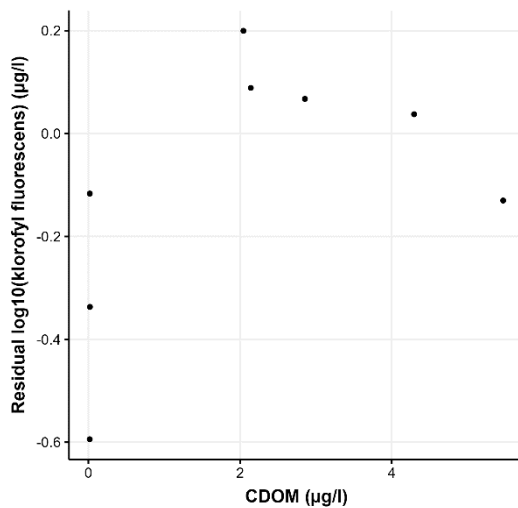


Bilag 3

Relation mellem residualer fra modellen for klorofyl fluorescens og CDOM-fluorescens

Figur 18 i rapporten viser sammenligning af klorofyl fluorescens med *in situ* klorofyl koncentration for målinger fra Nordsøen og viser resultater for at opstille en lineær model for relationen mellem logaritmer af de to parametre, med formen $\log(\text{Chl}_{\text{Fluorescens}}) = a + b \times \log(\text{Chl}_{\text{In-situ}})$.

Der bliver efterfølgende konkluderet at, CDOM kan ikke bruges til at korrigere de klorofyl-fluorescens målinger. Forklaringen med få data suppleres her med en figur der viser residualerne fra denne model for klorofyl-fluorescens plottet mod CDOM fluorescens målinger.



Rent vand – det er klart

NIVA Danmark er en nyetableret og uafhængig forsknings- og rådgivningsvirksomhed på vandmiljøområdet.

NIVA Danmark er et laboratorium i ordets klassiske betydning - et sted for øvelse, observation og testning. Særlig fokus har vi på forskningsbaseret gennemførelse af en række EU-direktiver, bl.a. vandrammedirektivet og havstrategidirektivet, og internationale konventioner (HELCOM, OSPAR og BDC). Vi rådgiver desuden relevante myndigheder og små og mellemstore virksomheder.

NIVA Danmark arbejder i vandløb, søer, fjorde og åbne havområder. Kerneområder er eutrofiering, miljøfarlige stoffer, biodiversitet, klimaforandringer, økosystemers sundhedstilstand samt effekter af menneskelige aktiviteter. Derfor udvikler vi indikatorer, overvågningsmetoder, værktøjer til tilstandsvurdering med et overordnet formål om at gennemføre analyser og synteseopgaver og bidrage til forsknings-baserede og bæredygtige løsninger på en lang række af de udfordringer vandmiljøet har.

NIVA Danmark er et lande-kontor under Norsk Institut for Vandforskning (NIVA). Vi har således en ressource-base på mere end 200 dedikerede forskere og eksperter.



Univate
Njalsgade 76, 4. sal
2300 København S
Danmark
Telefon: 39 17 97 33
E-post: mail@niva-dk.dk
CVR: 35431063
www.niva-danmark.dk