

# Bøjemålinger øger forståelsen af fjordenes dynamik

Højfrekvente målinger giver nyt indblik i fjordenes tidslige og rumlige variationer i vandkvalitet og biologiske processer. Erfaringer fra Roskilde Fjord vidner om en stor naturlig variation langs dybdegrader. Fremtidig implementering af bøjemålinger i danske farvande vil øge vores forståelse af fjordenes miljøtilstand og funktion og dermed bidrage til en bedre forvaltning.

PETER A.U. STÆHR, JESPER CHRISTENSEN, JONAS K. RØMER, JACOB CARSTENSEN & CHRISTIAN LØNBORG

## Gradienter og udfordringer i fjordene

Danske fjorde er lavvandede, produktive og en vigtig overgangszone fra land til det åbne hav /1/. Fjordene har klare gradienter i salinitet, koncentration af næringsstoffer, klorofyl og tydelige forskelle i udbredelse af vegetation samt bundfauna /2/. Tilførsler af organisk materiale og næringsstoffer fra land omsættes og tilbageholdes effektivt i fjordene og de bidrager herved positivt til opnåelse af god miljøtilstand i det åbne hav /3/. Vores fjordsystemer er stadig kraftigt påvirkede af histori-

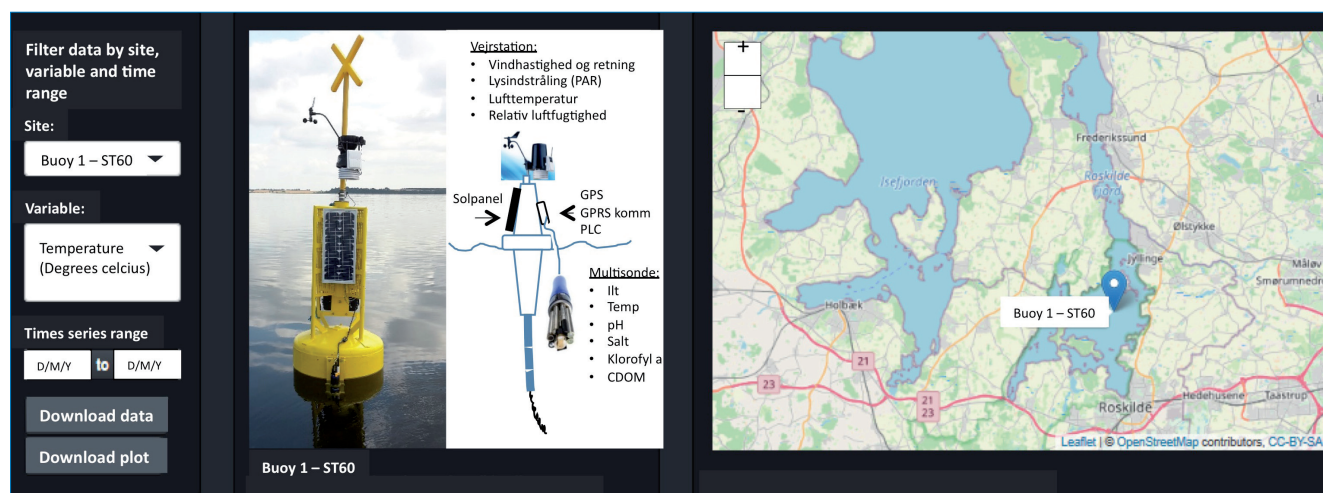
ske udledninger af spildevand og udvaskning af overskuds-næring fra tilstødende landbrugsarealer. På trods af flere indsatsplaner, er de fleste danske fjorde fortsat langt fra den ønskede økologiske tilstand /4/. En god forståelse af de naturgivne og menneskeskabte forhold, som påvirker miljøtilstanden er en forudsætning for optimal forvaltning og opnåelse af god økologisk tilstand.

I danske farvande bygger vores viden på årtiers systematiske skibsbaserede nationale målinger (NOVANA) af vandkvalitetsparametre såsom klorofyl, vandets klarhed, iltkoncentration og primærproduktion. Disse målinger indsamles typisk med 4 ugers mellemrum henover året. På trods af de mange målinger, er der stadig huller i vores viden om betydningen af kortvarige hændelser for variationer i

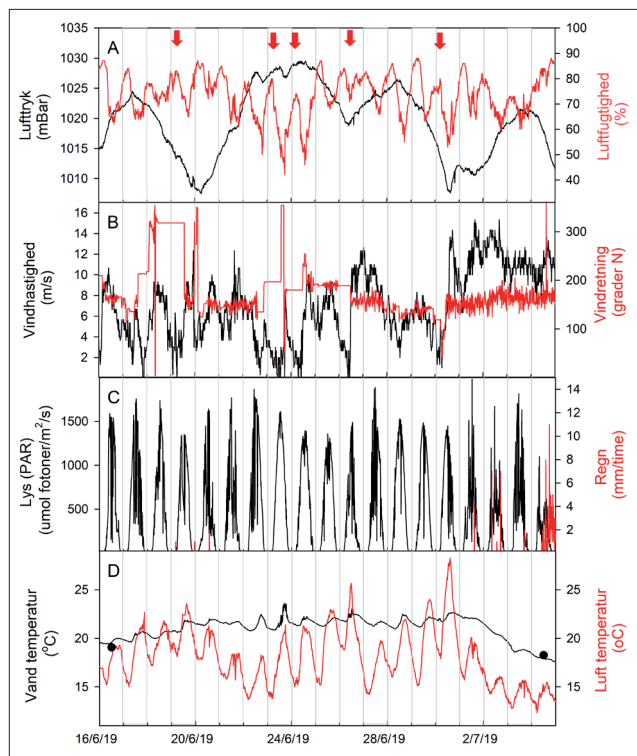
fjordenes vandkvalitet /5/. Da vores viden udelukkende er baseret på målinger fra centrale steder, ved vi kun lidt om gradienterne i selve fjordene.

## Erfaringer fra Roskilde Fjord

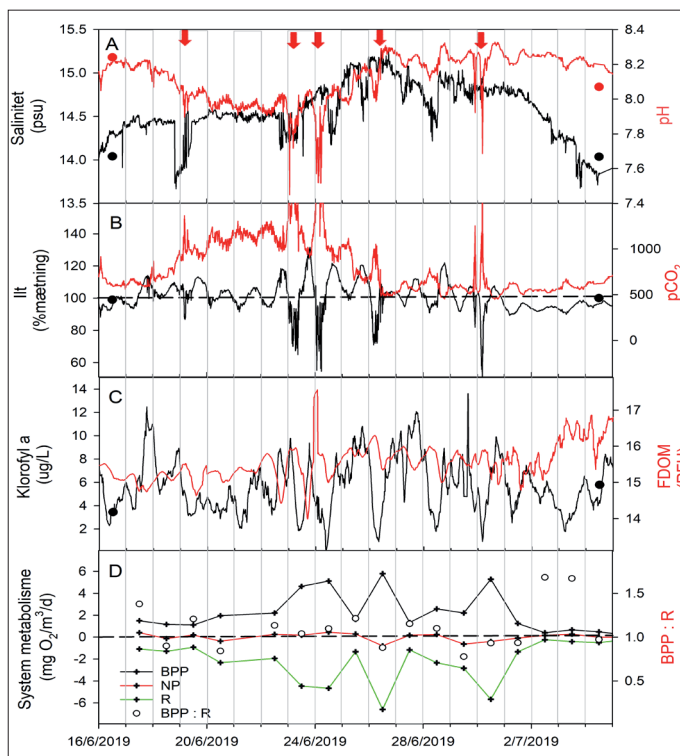
Højfrekvente målinger anvendes i stigende omfang til at dokumentere ændringer i en række kemiske, fysiske og biologiske processer i vandmiljøet /6/. Listen af tilgængelige sensorer er efterhånden ganske lang og omfatter flere parametre, som leverer interessante informationer om fysiske, kemiske og biologiske ændringer, der kan relateres til både klimaeffekter og eutrofiering (Tabel 1). Med de mest almindeligt anvendte sensorer kan man måle temperatur, salinitet, ilt, pH og lys hvert minut eller hurtigere. I Roskilde



Figur 1. Målebøjer i Roskilde Fjord. Kvalitetssikrede data fra Bouy 1 – St60 er placeret i en database og kan tilgås via en webserver (<https://shiny.bios.au.dk/seastatus/>).



Figur 2. Meteorologiske data indsamlet på St60 bøjen i løbet af 3 uger. Nederst (D) vises også vandtemperatur på 1 meters dybde samt to målinger indsamlet under NOVANA programmet (•). Pilene indikerer markante kortvarige vejrændelser.



Figur 3. Vandkemiske data indsamlet i 1 meters dybde på St60 bøjen i løbet af 3 uger. Fulde cirkler (•, •) er målinger under NOVANA programmet. Foruden rådata, ses afledte beregnede værdier for CO<sub>2</sub> partialtrykket (panel B) og system metabolisme rater for brutto primærproduktion (BPP), netto økosystem produktion (NP), økosystem respiration (R) og forholdet mellem BPP og R (panel D). Pilene indikerer markante kortvarige vejrændelser.

Fjord er sådanne højfrekvente målinger blevet indsamlet siden 2012 for at bestemme døgn- og sæsonvariationer i primærproduktion og respiration og forstå betydningen af meteorologiske forhold. I 2017 etablerede vi i den indre bredning af Roskilde Fjord (St 60) en avanceret målebøje udstyret med en multisonde og vejrstation, og disse data transmitteres direkte til en database, hvorfra de er tilgængelige og kan visualiseres via en webserver (Fig. 1). Denne målebøje er opbygget i samarbejde med Søfartsstyrelsen og firmaet Electromec.dk under projektet SeaStatus, som er finansieret af Innovationsfonden.

Data transmitteres direkte fra bøjerne i nært realtid, og lagres i databasen med mulighed for visualisering og deling af de nyeste data via webserveren. I praksis er det dog vigtigt, at rådata først gennemgår kvalitetssikring, inden de offentliggøres.

### Kvalitetssikring af rådata

De store mængder af data kræver en omhyggelig og systematisk behandling. Datamængder i høj tidslig opløsning er overordnet godt, men for mange usikre og fejlbehæftede data kan reducere anvendeligheden af data. Populært sagt er det som at drikke vand af en brandslange, når først data vælter ind. Der er

skrevet store lærebøger om håndtering af højfrekvente data blandt forskere som arbejder med meteorologiske data eller fx højfrekvente lyddata. Vores tilgang til behandling af data, kan opdeles i 6 faser:

1. Visuel inspektion af data når de er modtaget.
2. Identificere og markere potentielt fejlbehæftede data, typisk ekstreme eller manglende værdier.
3. Fjerne fejlbehæftede værdier. Enten manuelt eller ved anvendelse af datafiltre.
4. Fylde data huller ved interpolation eller anvendelse af løbende gennemsnit.
5. Kalibrering ift. supplerende skibsbaserede målinger. Da St60 bøjen er placeret ved en NOVANA station i Roskilde Fjord, har vi anvendt disse målinger til kalibrering af ilt, pH, salinitet og klorofyl.
6. Korrektion for sensordrift. Alle sensorer driver generelt over tid. Det ses typisk ved et gradvist faldende signal og kan identificeres og korrigeres, hvis man sammenligner data umiddelbart før og efter servicering og kalibrering. Problemet med sensordrift er mindre for målesonder som automatisk visker sensorhovederne rene.

### Beregning af procesparametre

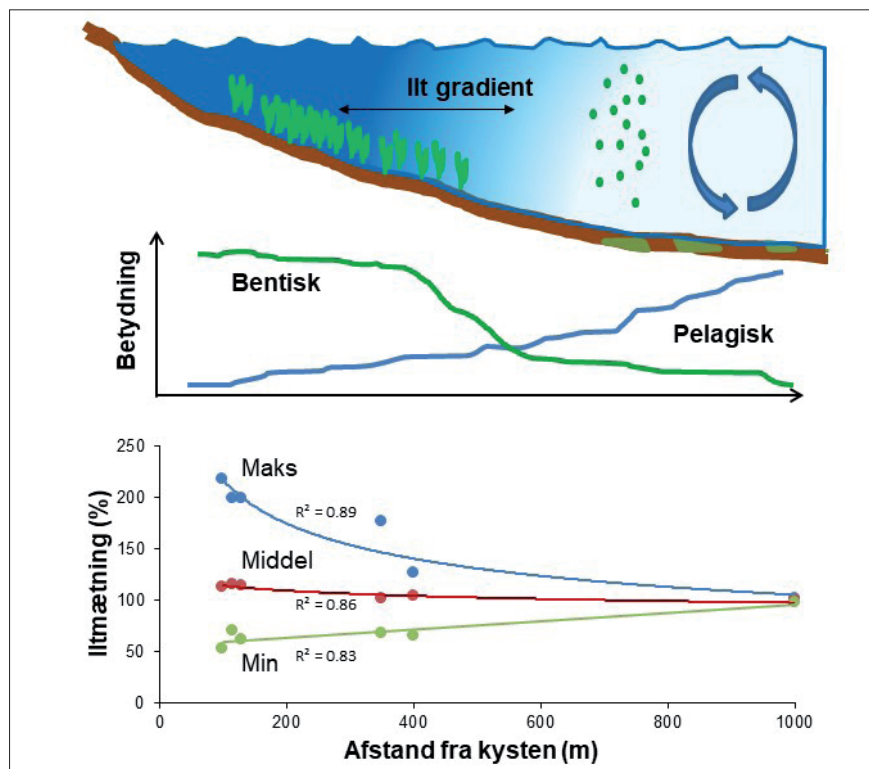
Kvalitetssikrede rådata indeholder en masse information, som kan anvendes til at beregne parametre, der afspejler biologiske rater. Dette kan fx være CO<sub>2</sub> partialtrykket (pCO<sub>2</sub>), som kan beregnes ved at kombinere målinger af pH, salinitet og temperatur kombineret med viden om systemets alkalinitet. Ligesom iltmætningsgraden er pCO<sub>2</sub> en indikator for balancen mellem produktion og nedbrydning af organisk materiale, men pCO<sub>2</sub> er også følsom overfor forskydninger i de kemiske ligevægte i vandsøjlen. Balancen mellem iltmætning og pCO<sub>2</sub> kan derfor give et indblik i vigtige biogeokemiske processer. Andre afledte procesparametre er rater for brutto primærproduktion (BPP), respiration (R) og netto produktion (NP) for økosystemet som helhed. Disse rater beregnes ved at modellere ændringer i iltkoncentrationen som funktion af lys og temperatur. I SeaStatus projektet har vi koblet sådan en model (<https://www.rdocumentation.org/packages/LakeMetabolizer/versions/1.5.0>) direkte til den webserver, som modtager data. Dette gør det muligt at få automatisk beregnede procesrater umiddelbart efter at data er modtaget fra bøjen.

### Stor tidslig dynamik

Data fra sommeren 2019 viste en systematisk

Tabel 1. Typiske sensorer på marine målebøjer, deres måleenheder, anvendelse og relevante miljøeffekter.

Hvor	Parameter	Enhed	Anvendelse	Miljøeffekter
Vandsøjlen	Temperatur	°C	Lagdeling (flere dybder) Hedeølger	Klima
	Salinitet	psu	Spore vandmasser, lagdeling (flere dybder)	Klima
	Ilt	mg O <sub>2</sub> / L og %mætning	Primærproduktion, respiration, iltsvind	Eutrofiering
	pH	-	uorganisk C	Klima (forsuring)
	CO <sub>2</sub>	µg CO <sub>2</sub> / L og %mætning	Primærproduktion, respiration, uorganisk C	Eutrofiering Klima (forsuring)
	Klorofyl a	(µg / L)	Algeopblomstring	Eutrofiering
	Phycocyanin	(µg / L)	Blågrønaler	Eutrofiering
	Turbiditet	(FNU)	Vandets klarhed	Eutrofiering
	Total suspenderet materiale	(mg / L)	Vandets klarhed, partikler	Eutrofiering
	FDOM	(RFU)	Farvede opløst organisk stof	Eutrofiering
Luften	Irradians (PAR)	µmol fotoner/ m <sup>2</sup> / s eller W / s	Beregne primærproduktion	Vejr, storm, klima
	Vind hastighed	m / s	Beregne gasudveksling	
	Vind retning	grader	Spore vandmasser	
	Relativ luftfugtighed	%	Vejrskift	
	Temperatur	°C	Hedeølger	
	Lufttryk	mBar	Vejrskift	



Figur 4. Fra kysten ud mod den centrale del af inderbredningen i Roskilde Fjord falder vegetationsdækket hvilket medfører at vandsøjens bidrag til systemets stofskifte bliver mere dominerende. Udsving i døgnvariationer for iltmætningen samt døgnmiddelværdien falder gradvist ud mod de dybere dele af fjorden. Målingerne blev udført vha. St60 bøjen suppleret med en serie små iltsonder på lavt vand i løbet af en uge i juni 2016.

døgnvariation i de målte meteorologiske parametre, luftfugtighed, vindhastighed, lysindstråling og lufttemperatur (Fig. 2).

Variationen i meteorologiske forhold afspejles også i de fleste målte parametre i vandfasen samt i de afledte proces parametre (Fig. 3).

Denne nærmest synkrone udvikling vidner om en tæt kobling mellem vejrforhold og kemiske og fysiske forhold og de biologiske komponenter som udgør fjordens økosystem. Ud over de systematiske døgnvariationer, ses flere eksempler på at kortvarige vejrhændelser kan medføre pludselige skift i fjordens salinitet og temperatur samt vandkvalitet målt ved koncentrationen af ilt, pH, pCO<sub>2</sub> og metabolisme rater. Dette svarer fint overens med observationer i søer ///. Oven i dette sker der mere glidende sæsonbetingede skift i vejrsystemet som sammen med ændringer i organismernes fysiologiske tilstand og populationsdynamik, regulerer fjordens vandkvalitet og dermed miljøtilstand.

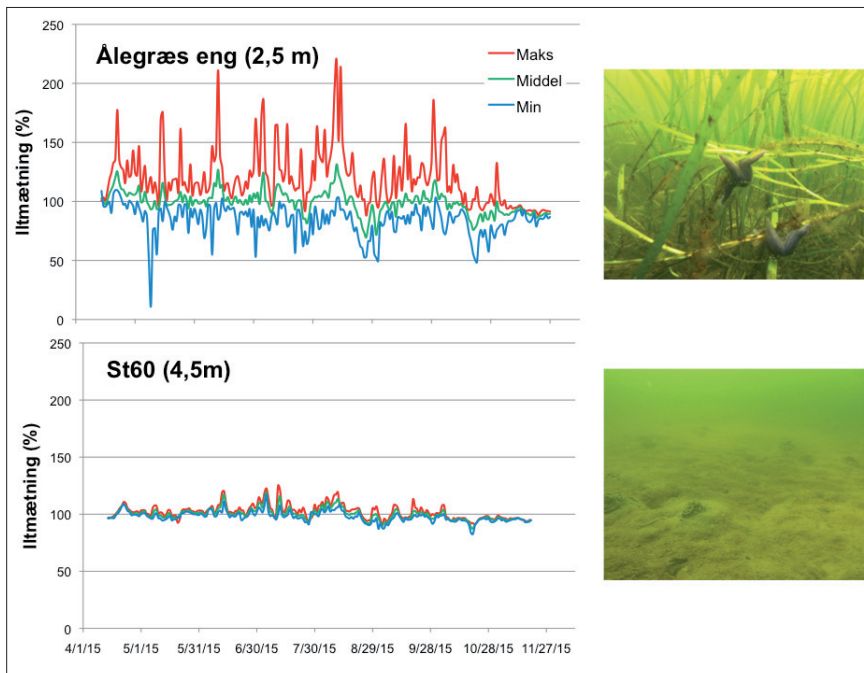
Dette tætte og følsomme samspil mellem regulerende forhold og tilstande i systemet viser styrken ved at følge fjordsystemet med højfrekvente målinger. Til sammenligning var der i den viste tre ugers periode kun to skibsbaserede målinger. Den lave hyppighed skibsbaserede målinger tilbyder, kan ikke opfange den kortvarige dynamik, som ses pga. døgnvariationen i omsætning og kortvarige vejrhændelser. Derimod kan skibsmålingerne give en god forståelse af den overordnede sæson- og år-til-år dynamik, mens de højfrekvente målinger kan give større forståelse af betydningen af kortvarige men potentielt meget vigtige hændelser /5/.

### Stor rumlig variation

Roskilde Fjord har langs de fleste kyststrækninger et udbredt vegetationsdække ud til ca 3 meters dybde. Herfra bliver bunden gradvist mere bar og ender typisk med en organisk beriget mudderbund på 4-5 meters dybde. Målinger foretaget vha. iltloggere, langs denne dybde- og afstandsgradient, viser en systematisk aftagende variation og niveau for iltkoncentrationen (Fig. 4).

Målingerne viser endvidere, at denne markante iltgradient er meget følsom overfor kortvarige vindbetingede vandbevægelser, som blander vandmasser med lavere ilt fra de dybere områder ind på lavt vand /5/. Ved at sammenligne årlige måleserier for ilt i fjorden, ses dog, at der er systematisk højere niveau og døgnvariation i iltkoncentrationen inde i ålegræsengene (Fig. 5). En repræsentativ forståelse af den biologiske aktivitet i lavvandede fjordsystemer, vil derfor forbedres betragteligt ved at supplere målinger i de centrale dybe





Figur 5. Målinger af iltmætningen i vandsøjlen, viser markant større daglig variation i et ålegræsbed på lavt vand end ved st60 bøjen på lidt dybere vand.

dele af systemet med mere kystnære målinger, hvor den dominerende vegetation findes.

### Anbefalinger i fht. implementering af målebøjer i overvågningen”

Målebøjer udstyret med sensorer er blevet væsentlig mere pålidelige, og anvendes i stigende omfang til overvågning af havmiljøet (fx ifm. Femern Bælt forundersøgelserne). I fjorde kan bøjerne med fordel placeres ved NOVANA stationer for at supplere med viden om variationer mellem prøvetagningerne, anvende skibsmålinger til kvalitetssikring af bøjedata og udnytte skibene til servicering af bøjerne. Bøjer placeret på lavere vand vil endvidere øge forståelse af vegetationens betydning. Måle-

bøjernes konfiguration vil kunne tilpasses det pågældende system og fx udføre målinger på flere dybder for at følge ændringer i bundnær iltvind.

For at øge den rumlige dækning er det også interessant at indtænke muligheden for at kombinere bøjedata med satellitdata. Her kan bøjerne levere data, som kan anvendes til at kalibrere satellitterne (klorofyl, temperatur og turbiditet). Det er fx svært, at få samhoørende målinger mellem satellitter og skibsbaserede målinger i tid og rum /8/. Dette problem kan overkommes med bøjemålinger som måler hele tiden. Endelig bør implementering af bøjer i den marine overvågning tænkes sammen med behovet for at kunne forstå og for-

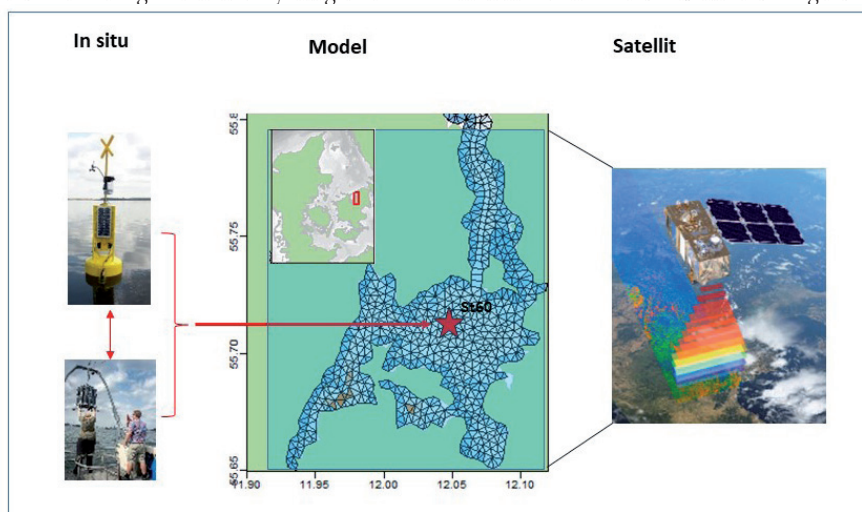
udsige tilstande vha. dynamiske og statistiske modeller, hvilket samlet kan understøtte forvaltningen af de danske havområder (Fig. 6).

Den teknologiske udvikling gør det snart muligt at få datatransmission fra bøjer i tæt ved realtid fra selv de mest afsidesliggende kroge af de danske farvande /9/. De nuværende sensorer er dog ikke tilstrækkelige til at måle alle relevante parametre. Følsomme sensorer til at måle næringssalte (ammonium, nitrat og fosfat) er stadig under udarbejdning /10/, så dele af overvågningen vil fortsat skulle baseres på skibe.

### Referencer

- Whitfield, A.K. et al. (2012). Paradigms in estuarine ecology. *Est. Coast & Shelf Sci.* 97: 78-90
- Stæhr, P.A. et al. (2017). Decadal changes in water quality and net productivity. *Est. & Coasts* 40: 63-79
- Carstensen, J. et al. 2020. Factors regulating the coastal nutrient filter in the Baltic Sea. *Ambio* 49: 1194–1210.
- Riemann, B. et al. (2016). Recovery of Danish Coastal Ecosystems After Reductions in Nutrient Loading: A Holistic Ecosystem Approach. *Est. & Coasts* 39: 82-97
- Stæhr, P.A. et al. (2018). Ecosystem metabolism of benthic and pelagic zones. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 601: 15–32
- Marcé, R. et al. (2016). Automatic high frequency monitoring. *Environ. Sci. & Tech.* 50.20: 10780-10794
- Jennings E. et al. (2012) Effects of weather-related episodic events in lakes: an analysis based on high-frequency data. *Freshwater Biology.* 57: 589-6
- Stæhr, P.A. et al. (2019). Use of remote sensing technologies for monitoring Chlorophyll-a and submerged aquatic vegetation in Danish coastal waters. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 139
- Lin, S. et al. (2020). An automatic instrument integration scheme for interoperable ocean observatories. *Sensors* 20:1990
- Maxime, M. et al. (2020). A Lab-On-Chip Phosphate Analyzer for Long-term In Situ Monitoring at Fixed Observatories: Optimization and Performance Evaluation in Estuarine and Oligotrophic Coastal Waters. *Frontiers in Marine Science* 2017, 4

PETER A.U. STÆHR (pst@bios.au.dk) og JACOB CARSTENSEN er professorer i marin økologi, JESPER CHRISTENSEN og JONAS K. RØMER er akademiske medarbejdere og CHRISTIAN LONBORG er specialkonsulent. Alle ved Aarhus Universitet.



Figur 6. Bøjer kan med fordel placeres ved eksisterende NOVANA stationer, som leverer brugbare data til kvalitetssikring af måleserier. Bøjerne kan både understøtte satellit data og kombineres med dynamiske og statistiske modeller. Herved opnås en bedre dækning i tid og rum og en optimeret forståelse af tilstande og processer.