



NOVANA-OVERVÅGNING AF NÆRINGSSTOFFER I MARINE SEDIMENTER

Indspil til optimering af overvågningsprogram

Teknisk rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 334

2025



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

NOVANA-OVERVÅGNING AF NÆRINGSSTOFFER I MARINE SEDIMENTER

Indspil til optimering af overvågningsprogram

Teknisk rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 334

2025

Signe Høgslund
Jacob Carstensen

Aarhus Universitet, Institut for Ecoscience



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

Datablad

Serietitel og nummer:	Teknisk rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 334
Kategori:	Rådgivningsrapporter
Titel:	NOVANA-overvågning af næringsstoffer i marine sedimenter
Undertitel:	Indspil til optimering af overvågningsprogram
Forfattere:	Signe Høgslund og Jacob Carstensen
Institution:	Aarhus Universitet, Institut for Ecoscience
Udgiver:	Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi ©
URL:	http://dce.au.dk
Udgivelsesår:	Februar 2025
Redaktion afsluttet:	Februar 2025
Faglig kommentering:	Jens Würgler Hansen
Kvalitetssikring, DCE:	Anja Skjoldborg Hansen
Sproglig kvalitetssikring:	
Ekstern kommentering:	Der er ingen kommentarer
Finansiel støtte:	Styrelsen for Grøn Arealomlægning og Vandmiljø
Bedes citeret:	Carstensen, J., Høgslund, S., 2025. NOVANA-overvågning af næringsstoffer i marine sedimenter. Indspil til optimering af overvågningsprogram. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 29 s. - Teknisk rapport nr. 334
	Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse
Sammenfatning:	<p>Det marine sediment påvirker iltbalancen i bundvandet, forekomsten af giftig svovlbrinte og frigivelsen af næringsstoffer til vandsøjlen. Det udgør det fysiske substrat, hvor bundplanter forankres og hvor bundfaunaen har sit levested, og sedimentet indgår bl.a. derfor i NOVANA overvågningen. Svovlbrinte overvåges ikke i det nuværende overvågningsprogram men kan forholdsvis let tilføjes til programmet. Svovlbrinte produceres i marine sedimenter, og er skadelig for bundfauna og rodfæstede planter, fx ålegræs. Analyser af data fra den tidligere overvågning af marine sedimenter viste, at der skal være relativt store ændringer i sedimentvariable, før ændringerne kan detekteres med tilstrækkelig statistisk sikkerhed. Prøvetagningsprogrammet bør derfor optimeres, hvis man ønsker at følge ændringer i sedimentet over tid. Analyserne viste at en øget prøvetagningsfrekvens vil være den mest effektive måde at forbedre programmet. Ud fra rammerne i den kommende sedimentovervågning foreslås prøvetagning på 18 stationer, der skal besøges hvert år, mod tidligere 28 stationer, som blev besøgt to gange over en femårig periode. Forslaget til placering af sedimentstationer i denne rapport tager ikke højde for fysisk forstyrrelse af havbunden. Nyere forskning peger på, at fysisk forstyrrelse påvirker sedimentkemien, og det vil være hensigtsmæssigt, at etablere baseline-målinger i områder, hvor der er planlagte ændringer i fx trawling-intensiteten.</p>
Emneord:	Marine sedimenter, NOVANA, overvågning, svovlbrinte, kvælstof-puljer, fosfor puljer, organisk stof, bentisk-pelagisk kobling.
Foto forside:	Signe Høgslund
ISBN:	978-87-7156-935-3
ISSN (elektronisk):	2244-999X
Sideantal:	29

Indhold

Sammenfatning	5
Summary	6
1 Forord	8
2 Sedimentet i det marine økosystem	9
3 Tidligere overvågning af danske marine sedimenter	11
4 Muligheder for bestemmelse af svovlbrintefrontens dybde samt organisk kulstof	13
5 Analyse af programmets sensitivitet	15
5.1 Bestemmelse af variationer i sedimentpuljer	16
5.2 Bestemmelse af sensitivitet i nuværende program	18
5.3 Diskussion af statistiske analyser	21
6 Forslag til prøvetagningsstrategier	23
6.1 Fokus på tidlige ændringer i sedimentets indhold af organisk stof og næringsstoffer.	23
6.2 Fokus på rumlig dækning af variationen i sedimentets indhold af organisk stof og næringsstoffer.	26
6.3 Fokus på effekter af fysisk forstyrrelse	26
6.4 Konklusion	27
7 Referencer	28

Sammenfatning

Det marine sediment påvirker den sæsonmæssige iltbalance i bundvandet, forekomsten af giftig svovlbrinte og frigivelsen af næringsstoffer til vandsøjlen. Desuden udgør sedimentet det fysiske substrat, hvor bundplanter forankres og hvor bundfaunaen har sit levested. Sedimentets sammensætning og stofomsætning kan derfor påvirke den økologisk tilstand både i vandsøjlen og direkte i havbunden. Derfor overvåges de marine sedimenter i det danske nationale overvågningsprogram (NOVANA).

Tidligere overvågning af marine sedimenter i Danmark har resulteret i et af verdens største sammenhængende datasæt, vedrørende bentisk-pelagisk kobling, og resultaterne fra overvågningen indgår i flere videnskabelige publikationer.

Formålet med NOVANA overvågningen af marine sedimenter er at følge eventuelle ændringer over tid. For at vurdere, hvor stor en ændring i sedimentpuljerne, der vil kunne detekteres i et overvågningsprogram, er det nødvendigt at kende variationerne i data. De eksisterende data viser, at den samlede tilfældige variation i den model, der anvendes til dataanalyse, ligger mellem 87% og op til 265 %. Simuleringer med baggrund i disse variationer viste, at ændringerne i puljerne skulle være omkring 10 % til 15 % for at kunne detekteres med tilstrækkelig sikkerhed med den tidligere anvendte prøvetagningsstrategi. En undtagelse var puljen af jernbundet fosfor, hvor den tilfældige variation var så stor, at det vil være usikkert om en ændring i puljen vil kunne ses, selvom ændringen var på fx 100 %.

En ændring på 10 % til 15 % er en forholdsvis stor ændring, og det er derfor ønskeligt at prøvetagningsprogrammet tilrettelægges, så sensitiviteten øges.

Variansanalyserne viste, at hvis man fokuserer på at overvåge ændringer over tid, vil en øgning af prøvetagningsfrekvensen give mindre tilfældig variation og dermed øget sandsynlighed for at detektere ændringer. Anbefalingen er derfor at man i et kommende overvågningsprogram mindsker antallet af stationer og øger prøvetagningsfrekvensen. Ud fra rammerne i den kommende sedimentovervågning foreslås prøvetagning på 18 stationer, der skal besøges hvert år. Mod tidligere 28 stationer, som blev besøgt to gange inden for en femårig periode.

Forslaget til placering af sedimentstationer i denne rapport tager ikke højde for fysisk forstyrrelse af havbunden. Nyere forskning peger på, at fysisk forstyrrelse påvirker sedimentbiogeokemien, men det fulde omfang af denne påvirkning er uklar. I forvaltningssammenhæng vil det være hensigtsmæssigt at etablere baseline-målinger i områder, hvor der er planlagte ændringer i fx trawling-intensiteten, da det vil give mulighed for at dokumentere ændringer i sedimentbiogeokemien som følge af ændringer i den fysiske påvirkning.

Sedimentkemien er tæt forbundet med havbundens egnethed som substrat, det er især forekomsten af svovlbrinte, der direkte påvirker livet i og på havbunden. Svovlbrinte er en cellegift, der produceres når organisk stof omsættes i marine sedimenter, og den er skadeligt for både bundfauna og rodfæstede planter, fx ålegræs. Hvis der findes høje koncentrationer af svovlbrinte tæt på sedimentets overflade, er der risiko for forgiftning af livet i vandsøjlen ved udslip af svovlbrinte i tilfælde af iltsvind. Svovlbrinte forekomsten varierer med flere af de vigtigste marine presfaktorer; eutrofiering, organisk belastning af havbunden, temperatur, fysisk forstyrrelse og iltsvind, men svovlbrinte overvåges ikke i det nuværende overvågningsprogram. Parameteren kan dog forholdsvis let tilføjes til programmet.

Summary

Marine sediments play a critical role in regulating the seasonal oxygen balance in bottom waters, the presence of toxic hydrogen sulfide, and the release of nutrients into the water column. Additionally, sediments serve as the physical substrate for benthic plants to anchor and provide habitat for benthic fauna. The composition and biogeochemical processes of sediments significantly influence the ecological status of both the water column and the seafloor. As a result, marine sediments are a key focus of the Danish National Monitoring Program (NOVANA).

Denmark's previous efforts in monitoring marine sediments have resulted in one of the world's most extensive and coherent datasets on benthic-pelagic coupling. The findings from this monitoring have contributed to several scientific publications.

The primary objective of the NOVANA marine sediment monitoring is to track long-term changes. To determine the magnitude of changes in sediment pools that can be reliably detected within a monitoring program, it is essential to understand the inherent variability in the data. Existing data reveal that the total random variation in the model used for data analysis ranges between 87% and 265%. Simulations based on this variability indicate that changes in sediment pools would need to be in the range of 10% to 15% to be detectable with sufficient confidence using the previous sampling strategy. An exception is the pool of iron-bound phosphorus, where the random variation is so high that even a 100% change in the pool might not be reliably detected.

A change of 10% to 15% is relatively substantial, highlighting the need to optimize the sampling program to improve sensitivity.

Variance analyses suggest that if focus of the monitoring program is to monitor changes over time, increasing sampling frequencies is the best way to reduce random variation and improve the likelihood of detecting significant changes. To achieve this, it is recommended to reduce the number of sampling stations while increasing the sampling frequency. Under the proposed framework for future sediment monitoring, sampling would occur at 18 stations annually, compared to the previous approach of monitoring 28 stations twice over a five-year period.

The proposed locations for sediment monitoring stations in this report do not account for physical disturbances to the seafloor. Recent research indicates that physical disturbances, such as trawling, can significantly impact sediment biogeochemistry, although the full extent of these effects remains unclear. From a management perspective, it would be beneficial to establish baseline measurements in areas where changes in physical impacts, such as trawling intensity, are anticipated. This would enable the documentation of changes in sediment biogeochemistry resulting from altered physical conditions.

Sediment chemistry is closely tied to the suitability of the seafloor as a habitat, particularly the presence of hydrogen sulfide, which directly affects life in and on the seabed. Hydrogen sulfide, a cellular toxin produced during organic matter decomposition in marine sediments, is harmful to benthic fauna and rooted plants like eelgrass. High concentrations of hydrogen sulfide near the sediment surface pose a risk of poisoning organisms in the water column, especially during oxygen depletion events. The occurrence of hydrogen sulfide is influenced by several key marine pressure factors, including eutrophication, organic loading of the seafloor, temperature, physical disturbance, and

oxygen depletion. Despite its ecological significance, hydrogen sulfide is not currently monitored in the existing program. However, this parameter could be relatively easily incorporated into future monitoring efforts.

1 Forord

Inden for EU's vandrammedirektiv indgår "sedimentovervågningen" i beskrivelsen af havbundens beskaffenhed, herunder sedimentets indhold af organisk stof og næringsstoffer. Desuden er overvågningen af marine sedimenter tilknyttet vandrammedirektivets hydromorfologiske kvalitetselement (bundssubstrat). Styrelsen for Grøn Arealomlægning og Vandmiljø (SGAV) har gennemgået det nationale overvågningsprogram iht. til de krav, der stilles til den marine overvågning i EU-regi. Her blev det påpeget, at sedimentforholdene skal belyses i alle danske vandområder. Dette ønskes gjort ved at overvåge udvalgte vandområder, der repræsenterer den variation, der findes i de danske havområder omfattet af vandrammedirektivet.

SGAV har derfor rekvireret denne rapport, der giver input til tilrettelæggelse og optimering af overvågningsprogrammet for marine sedimenter.

I rapporten analyseres den tilfældige variation i det nuværende overvågningsprogram. Analysen danner grundlag for forslag til fremtidige strategier for sedimentovervågningen. Desuden gives der forslag til, hvordan overvågningen kan forbedres, så havbundens beskaffenhed som habitat for bundfauna, makrovegetation og bentiske mikroalger kan indgå i overvågningen.

SGAV har opstillet følgende rammer for forslag til fremtidig NOVANA-overvågning af marine sedimenter:

- Prøvetagning på max 18 stationer om året
- Fortsættelse af eksisterende tidsserier
- Afdækning af dynamikken i forskellige sedimenttyper/bundforhold
- Afdækning af dynamikken i fjorde og åbne indre farvande
- Programmet skal løbe over 3 + 6 år

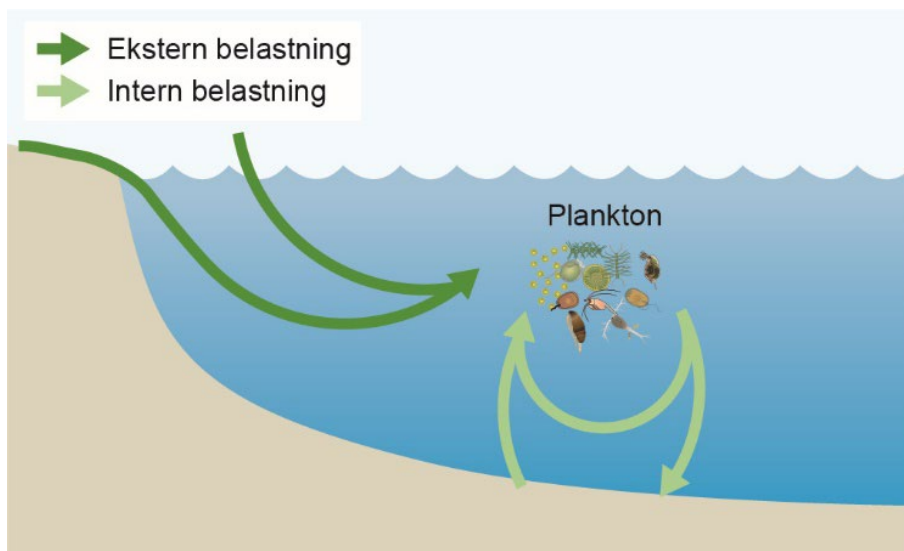
Rapporten har været i høring hos SGAV forud for offentliggørelsen.

2 Sedimentet i det marine økosystem

Den bløde havbund, som også kaldes marine sedimenter, er en integreret del af det marine økosystem. Sedimentets store lager af organisk stof og næringsstoffer har vigtige regulerende funktioner i økosystemet. Sedimentet påvirker den sæsonmæssige iltbalance i bundvandet, forekomsten af giftig svovlbrinte og frigivelse af næringsstoffer til vandsøjlen, som igen påvirker livsbetingelserne i havbunden og bundvandet og væksten af planteplankton. Desuden udgør sedimentet det fysiske substrat, hvor bundplanter forankres og hvor bundfaunaen har sit levested. I de områder, hvor lyset når bunden, vokser benthiske mikroalger på overfladen af sedimentet og danner tætte fotosyntetiserende måtter. Sedimentets sammensætning og stofomsætning kan derfor påvirke den økologisk tilstand både i vandsøjlen og direkte i havbunden.

Lagringen af kulstof, kvælstof og fosfor og frigivelsen af næringsstoffer fra havbunden afhænger af tilførslen af organisk stof (figur 2.1). Mellem 25 og 50 % af planktonalgernes produktion ender på havbunden i kystnære sedimenter (Jørgensen 1996), og organisk stof fra land bidrager også til det organiske stof i havbunden. Havbunden modtager kvælstof og fosfor indbygget i det organiske stof, der synker ned gennem vandsøjlen. En del af det sedimenterede organiske stof begravnes mere eller mindre permanent i havbunden, og det resterende nedbrydes. En del af de næringsstoffer, som planteplankton har optaget fra havvandet, vil derfor senere blive frigivet fra sedimentet og danne grundlag for ny produktion. Sedimentet recirkulerer dermed en del af tilførslerne fra land, hvilket nogle gange betegnes som intern belastning.

Figur 2.1. Eksterne og interne kilder til næringsstoffer i vandsøjlen.



Der er stor forskel på, hvor meget sedimentet bidrager til planktonets næringsstofbehov. Data fra NOVA-overvågningen af danske marine sedimenter i sluthalvfemserne viser en markant årstidsvariation i frigivelsen af næringsstoffer fra sedimenterne i danske fjorde (Høgslund m.fl. 2023). Størrelsen af sedimentets frigivelse af næringsstoffer varierer fra fjord til fjord, men generelt er der et optag i sedimenterne af nitrat i forårsmånederne, og en markant frigivelse af ammonium og fosfor i sensommeren og efteråret (Høgslund m.fl. 2023). Internationale undersøgelser viser, at af det kvælstof og fosfor, som plankton i fjorde og kystvande optager fra vandsøjlen, stammer henholdsvis 15-32 % og 17-100 % fra sedimentets recirkulerede næringsstofpulje (Boynton m.fl. 2018, Knudsen-Leerbeck m.fl. 2017).

I lavvandede områder betyder den tætte kobling mellem sediment og vand-søjle, at ændringer i primærproduktionen forplanter sig til sedimentets indhold af kulstof, kvælstof og fosfor. En øget primærproduktion giver en øget stoftilførsel og et højere indhold af kulstof og næringsstoffer i sedimentet (Jørgensen *m.fl.* 2022). Omvendt er der tegn på, at der i systemer, hvor primærproduktionen er faldende pga. reduceret næringsstofftilførsel, sker en reduktion af sedimentets puljer af organisk stof, kvælstof og fosfor, og ligeledes en reduktion i frigivelsen af næringsstoffer fra sedimentet til bundvandet. I de få områder - Chesapeake Bay og Boston Harbour i USA, hvor man løbende har fulgt afviklingen af de opbyggede næringsstofpuljer i sedimentet, har målingerne vist, at sedimentet responderer forholdsvist hurtigt på reducerede tilførsler af organisk stof, og at den væsentligste andel af afviklingen foregår i løbet af få år efter, at den organiske stoftilførsel er blevet reduceret (Testa *m.fl.* 2022, Tucker *m.fl.* 2014). Overvågningen af danske sedimenter har ikke vist signifikante ændringer i havbundens puljer af organisk stof og næringsstoffer fra 1999-2003 til 2017-2021. Det indikerer, at langt det meste af den labile del af de opbyggede puljer som følge af den forhøjede primærproduktion i starten af 1990'erne var afviklet i 1999-2003 og derfor ikke resulterede i en større frigivelse af næringsstoffer fra sedimentet i perioden op til 2017-2021 (Hansen og Høgslund *red.* 2023).

3 Tidligere overvågning af danske marine sedimenter

Marine sedimenter i Danmark er blevet overvåget i to programperioder: Under NOVA-programmet fra 1999 til 2003 og i NOVANA-programmet fra 2017 til 2021. Desuden er der foretaget sedimentovervågning i 2022-2024 i en overgangsperiode til et nyt NOVANA-program.

NOVA-programmet inkluderede en lang række parametre, som ikke bliver fulgt i NOVANA-programmet: Sedimentets svovlbrintebufferkapacitet, svovlbrintefrontens dybde, sedimentets indhold af oxideret jern, fluxe, dvs. udveksling mellem sediment og bundvand, af ilt- og næringsstofferne nitrat, nitrit, ammonium, urea, opløst silisium og fosfor. Desuden blev der foretaget en beskrivelse af sedimentet med oplysninger om belægnings med bentiske mikroalger, makrofauna, lagdeling og farve i et dybdeprofil (*Kaas og Markager red. 1998*).

Der ligger således et solidt datagrundlag fra omkring årtusindskiftet på den bentiske pelagiske kobling i danske fjorde, der kan tjene som sammenligningsgrundlag for nye undersøgelser. Programmet var så omfattende, at det i dag er det største sammenhængende datasæt med sedimentfluxe - også internationalt (*Høgslund m.fl. 2023, Boyton m.fl. 2018*).

I perioden 2017-2021 dækkede NOVANA-overvågningen 28 stationer, der også indgik i NOVA-programmet. Hver station blev besøgt to gange i løbet af den femårige overvågningsperiode. På hver station målt totalt kvælstof (N), total fosfor (P), jernbundet fosfor, tørstof, vægtfylde og organisk stof (glødetab) i et dybdeprofil, der i syv dybder dækker de øverste 10 centimeter af sedimentet (*Fossing 2018*).

Samlet er der foretaget analyser af sedimentets puljer af organisk stof, næringsstoffer, tørstof og vægtfylde på 44 stationer i danske farvande siden 1999 (*tabel 3.1*).

Data indsamlet i den nationale overvågning af marine sedimenter indgår i en række videnskabelige publikationer, hvoraf de nyeste er:

- Høgslund, S., Fossing, H. Carstensen, J. 2023. Microphytobenthic impact on benthic pelagic nutrient exchange in temperate shallow estuaries. *Estuarine, coastal and shelf science*. 292, 108475
- Leiva-Duenas, C., Holbach, A. Göke, C., Carstensen, J. & Krause-Jensen, D. 2023. Potential effects of trawling-free zones on carbon stocks of Danish eelgrass meadows. – Scientific briefing no. 2023 | 14
- Høgslund, S., Carstensen, J., Krause-Jensen, D. & Hansen, J.L.S. 2018. Sammenhænge i det marine miljø - Betydning af sedimentændringer. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 70 s. Videnskabelig rapport nr. SR323
- Kindeberg, T., Orberg, S. B., Rohr, M. E., Holmer, M., & Krause-Jensen, D. (2018). Sediment Stocks of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Danish Eelgrass Meadows. *Frontiers in Marine Science*, 5. doi:10.3389/fmars.2018.00474
- Knudsen-Leerbeck, H., Mantikci, M., Bentzon-Tilia, M., Traving, S. J., Riemann, L., Hansen, J. L. S., & Markager, S. (2017). Seasonal dynamics and bioavailability of dissolved organic matter in two contrasting temperate estuaries. *Biogeochemistry*, 134(1-2), 217-236.
- EU projektet MPAEurope (2023-2027) benytter også sedimentpuljer fra en database (EUROCARBON) over kulstofindhold mm i forskellige typer havbund i Europa. <https://mpa-europe.eu/the-euro-blue-carbon-database-at-first-glance/>

Tabel 3.1. Oversigt over tidligere sedimentstationer med angivelse af årstal for prøvetagningerne. Prøvetagningerne er foretaget i januar-februar undtagen i Kalundborg og Sejerø Bugt i 2023 (*), hvor prøvetagningen var i december

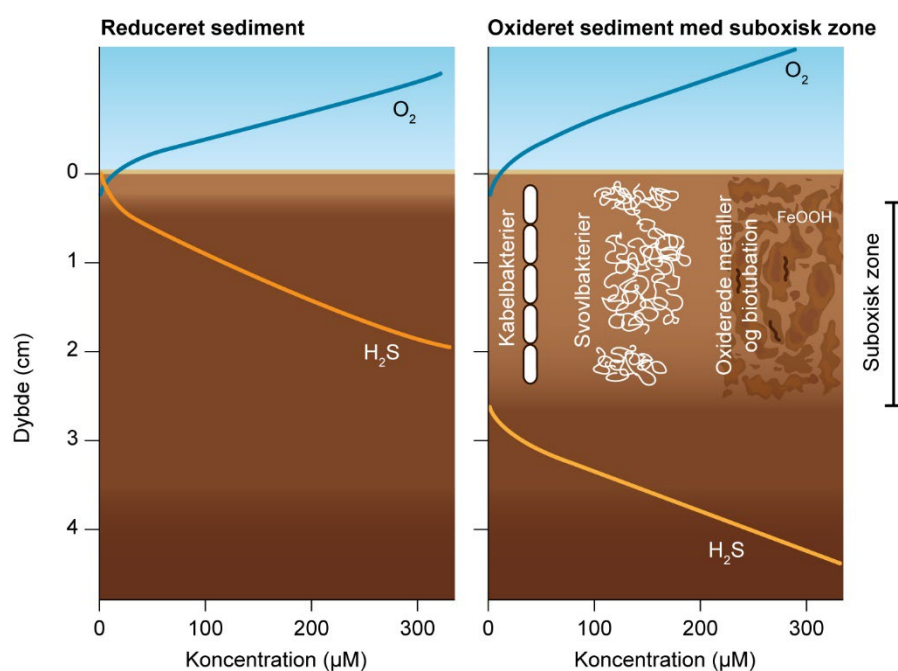
Stednavn	Stations ref.	Sted ID	1999	2003	2004	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	Ialt
Aborg Minde	FYN0018172	95410006										1		1
Basnæs Nor	BF Basnæs Nor	96220323										1		1
Amstrup Red	VEJ0006592	94330004	1	1		1	1						1	5
Horsens Fjord	VEJ0006089	94330003	1	1									1	3
Nissum Fjord	RKB23	91240003	1		1			1		1				4
Flensborg Fjord, åbne del	SJYKFF5	95700001	1	1		1	1					1		5
Okseøerne	SJYKFF2	95710002	1	1		1	1					1		5
Frederiksværk Bredning	FRB65	93220004			1								1	2
Holckenhavn Fjord	FYN0018752	96720002										1		1
Vejle Fjord	VEJ0004273	95130002	1	1				1	1					4
Husodde	VEJ0005790	94330002	1	1		1	1						1	5
Kalundborg fjord	VSJ41007	96110002	1	1				1		1		*1		5
Kalundborg fjord	VSJ41114	96110004	1	1									1	3
Kalø Vig, ydre del	ARH170002	94410004	1	2				1	1					5
Kattegat, åbne del	ARH190409	93000005	1										1	2
Korsør Nor	BF Korsør Nor	96140028										1		1
Kås Bredning	VIB3705-00001	93750006	1	1					1	1	1			5
Løgstør-Livø Bredning	VIB3708-00001	93730002	1	1					1	1	1			5
Mariager Fjord, midterste del, Dybet	NOR5503	93610032	1	1										2
Mariager Fjord, midterste del	NOR5507	93610235						1						1
Mariager Fjord, øst f. Stinesminde	ARH240024	93610010	1	1			1	1			1			5
Nakkebølle Fjord	FYN0018361	96510005	1	1					1	1				4
Nibe Og Gjølbredning	VIB3711-00002	93720003	1	1					1	1	1			5
Nissum Mellemfjord	RKB22	91240002	1	1				1		1				4
Nordlige Lillebælt	VEJ0006870	94300001	1	1					1	1				4
Nybøl Nor	SJYFF31	95720001										1		1
Odense Fjord, ydre del	FYN6900803	94230017	1	1										2
Odense Fjord, ydre del	FYN6900804	94230018	1	1		1	1						1	5
Ringgård Bassin, åbne del	FYN6500051	96510001	1	1			1	1					1	5
Ringkøbing Fjord, midt	RKBSED6	91320021	1	1										2
Ringkøbing Fjord, nord	RKBSED1	91320019	1	1		1	1						1	5
Ringkøbing Fjord, syd	RKBSED2	91320020	1	1		1	1						1	5
Roskilde Bredning	ROS60	93220011	1		1				1	1				4
Seden Strand	FYN6910008	94230020	1	1		1	1						1	5
Skive Fjord	VIB3727-00001	93740007	1	1		1		1			1			5
Thisted Bredning	VIB3723-00001	93760006	1	1					1	1	1			5
Vejle Fjord	VEJ0003772	95130005	1	1									1	3
Øksenholt Bredning	8500	93220028	1		1				1	1				4
Øresund, nord	KBK3008	97200044	1	1		1		1						4
Øresund, nord, åbne del	KBH5000	97200003						1						1
Øresund, Tårbæk	KBK5000	97200046	1	1		1		1						4
Darss Tærsklen	STO0901016	99200001										1		1
Sejerø Bugt	BF_SEJ	94120008										*1		1
Aarhus Bugt	ARH170006	94400007	1	2				1	1					5
Ialt			34	32	4	11	10	13	11	11	6	10	12	154

4 Muligheder for bestemmelse af svovlbrinte-frontens dybde samt organisk kulstof

Den mest oplagte parameter til at beskrive havbundens beskaffenhed som substrat er svovlbrinte-frontens dybde, dvs. udstrækningen af den svovlbrintefrie zone i sedimentet (figur 4.1). Svovlbrinte er en cellegift, der produceres i iltfrie marine sedimenter. Det har stor betydning for bundfaunaens livsvilkår, hvorvidt svovlbrinten trænger helt op i nærheden af sedimentoverfladen, eller om der er en dyb zone på flere cm i sedimentet, der er fri for svovlbrinte. Svovlbrinte påvirker også rodfæstede planter, dvs. havgræsser og kransnålalger, negativt. Hvis der er høje svovlbrintekoncentrationer få mm fra sedimentets overflade, er der risiko for udslip af svovlbrinte fra sedimentet under iltsvind. Hvis svovlbrinte-fronten derimod ligger dybt i sedimentet, har sedimentet en stor ilttingsreserve og kan modstå en længere periode med iltsvind, inden svovlbrinte og andre reducerede forbindelser frigives til bundvandet. Svovlbrinte-frontens dybde afhænger især af sedimentets indhold af jern og varierer bl.a. med tilførslen af let omsætteligt organisk materiale, iltsvind, bundfaunaens sammensætning og temperatur. Svovlbrinte-frontens dybde er dermed en parameter, der integrerer flere af de vigtigste presfaktorer, der påvirker havmiljøet.

Svovlbrinte-frontens dybde indgår ikke i den nuværende overvågning, men kan forholdsvis let tilføjes overvågningsprogrammet. Dybden af den svovlbrintefrie zone kan bestemmes ved at stikke en lille sølvplade ned i sedimentet. I den del af sedimentet, hvor der findes svovlbrinte, sortfarves sølvpladen (Ag_2S), mens den ikke farves i den svovlbrintefrie del af sedimentet (Kaas og Markager red. 1999, Nielsen m.fl. 1990). Afstanden fra sedimentoverfladen til starten på sværtningen af sølvpladen angiver svovlbrinte-frontens dybde. Der findes også andre mere præcise metoder, hvor koncentrationen af svovlbrinte måles direkte, men disse er langt mere arbejdskrævende.

Figur 4.1. Tværsnit af dybdeprofil i et reduceret og oxideret sediment. Svovlbrinte- og iltkoncentrationen er afbilledet på x-aksen. Svovlbrinte-frontens dybde er afstanden fra sedimentets overflade til forekomsten af svovlbrinte (orange kurve). Forskellige typer bakterier og især bundfaunaen er vigtige organismer for at opretholde en svovlbrintefri zone. Efter Høgslund m.fl. 2018.



Ændringer i svovlbrintefrontens dybde afspejler ændringer i økosystemet. En lavere dybde skyldes mere reducerede forhold (iltsvind), ændringer i bundfaunasamfundet og/eller øget sedimentation af let omsætteligt organisk stof. En dybere svovlbrintefront vil omvendt være et resultat af høj bioturbation, gode iltforhold og/eller nedsat tilførsel af let omsætteligt organisk stof. Derfor ses fx en sammenhæng mellem svovlbrintefrontens dybde og bundfaunaens diversitet beskrevet ved DKI indekset (*Jørgensen m.fl. 2019, Høgslund m.fl. 2018*).

Sedimentets indhold af organisk kulstof er en parameter, der også kan inkluderes i overvågningen. Organisk kulstof er et mere præcist mål for kulstoflagringen i sedimentet end glødetab, og kulstofindholdet måles samtidig med bestemmelsen af totalt kvælstof uden behov for ekstra analyser. Hvis man ønsker at bestemme det organiske kulstof indhold, skal prøverne dog syrebehandles forud for analysen.

5 Analyse af programmets sensitivitet

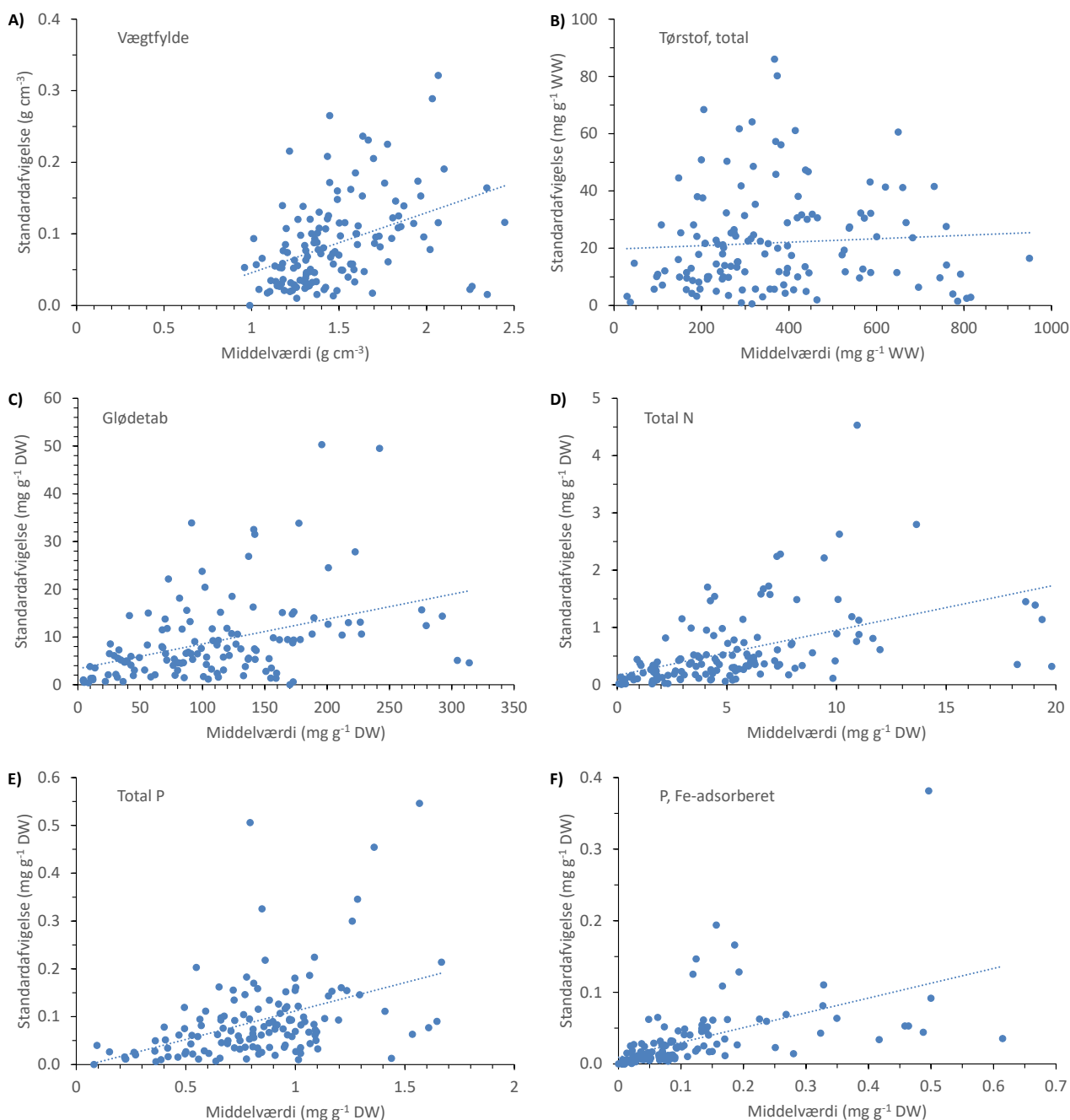
For at vurdere, hvor stor en ændring i sedimentpuljerne, som vil kunne detekteres ved det nuværende og et fremtidigt ændret overvågningsprogram, er det nødvendigt at kende variationerne i data i forhold til den statistiske analyse, som vil blive anvendt til at vurdere en ændring i sedimentpuljerne over tid. Når den tilfældige variation er lille, øges sandsynligheden for at detektere mindre ændringer i puljerne. Sedimentpuljerne analyseres med nedenstående model, som også er anvendt i forbindelse med tidligere afrapporteringer af sedimentovervågningsdata:

$$Y_{ijk} = period_i + wb_j + period_i \times wb_j + d(wb)_{jk} + period_i \times d(wb)_{jk} \\ + YR(period)_{il} + YR(period \times wb)_{ijl} + STAT(wb)_{jm} \\ + STAT(period \times wb)_{ijm} + STAT(wb \times d)_{jkm} \\ + STAT(period \times wb \times d)_{ijkm} + e_{ijklm}$$

hvor systematiske (deterministiske) variationer er angivet med små bogstaver, og tilfældige (stokastiske) variationer er angivet med store bogstaver. Faktorerne i modellen beskriver:

- $period_i$ er den overordnede forskel mellem de to undersøgelsesperioder (1999-2003 versus 2017-2023)
- wb_j er den rumlige forskel mellem vandområder
- $period_i \times wb_j$ beskriver forskellen over tid mellem vandområder
- $d(wb)_{jk}$ er variationen over dybden indenfor vandområder
- $period_i \times d(wb)_{jk}$ er ændringer over tid i dybdefordelingen indenfor vandområder
- $YR(period)_{il}$ er den tilfældige år-til-år variation indenfor de to perioder fælles for alle vandområder
- $YR(period \times wb)_{ijl}$ beskriver den tilfældige år-til-år variation indenfor perioder og vandområder
- $STAT(wb)_{jm}$ beskriver den tilfældige variation mellem stationer indenfor vandområder, som ikke ændrer sig over tid
- $STAT(period \times wb)_{ijm}$ beskriver den tilfældige variation mellem stationer indenfor vandområder og perioder
- $STAT(wb \times d)_{jkm}$ beskriver den tilfældige variation i dybdefordelingen mellem stationer indenfor vandområder
- $STAT(period \times wb \times d)_{ijkm}$ beskriver den tilfældige variation i dybdefordelingen mellem stationer indenfor vandområder og perioder
- e_{ijklm} beskriver residualvariationen, som udtrykker variationen mellem de tre replikate sedimentkerner (1-2 cm dybde)

Alle sedimentvariable er log-transformeret, inden de er analyseret ved ovenstående model. Dette skyldes, at variationen i disse variable afhænger af middelniveauet, så der er større variation for høje målinger end for lave målinger (figur 5.1). En lineær sammenhæng mellem standardafvigelse og middelværdi indikerer, at observationerne skal log-transformeres inden den statistiske analyse. Konsekvensen af en log-transformation er, at alle variationer i modellen bliver relative til middelniveauet. Den relative spredning beregnes ud fra den estimerede varians ($\exp(\sqrt{V[\]}) - 1$). Den totale varians findes ved at lægge alle variansbidrag sammen og derefter bestemme den relative spredning, som angivet ovenfor.



Figur 5.1. Afbildning af standardafvigelser mod middelværdier for replikater (1-2 cm) af de seks målte sedimentvariable. Tendenslinjer er indsat for at vurdere, om variationen i data stiger med middelniveauet.

5.1 Bestemmelse af variationer i sedimentpuljer

Ovenstående model er bestemt på basis af sedimentovervågningsdata for de seks målevariable (995-1105 observationer pr variabel) og deraf afledte variable, som er målevariable normaliseret i forhold til vådvægt, volumen og tørvægt. Kun observationer fra vintermåned er medtaget, idet der kun var sporadiske observationer fra sedimentovervågningen i sommermånederne. I tabel 5.1 er de estimerede varianser for de tilfældige effekter i modellen omsat til relative spredninger ved transformationen angivet ovenfor. Dvs. at værdierne i tabel 5.1 angiver, hvor stor variationen for den enkelte faktor er ift. middelværdien.

Tabel 5.1. Relative spredninger af de tilfældige variationer for målevariable og deres afledte variable (markeret med gråt) bestemt ud fra de estimerede varianser for de tilfældige effekter i modellen. GT=glødetab, Fe-P=jernbundet fosfor og i parentes VV=normaliseret til vådvægt, vol=normaliseret til volumen og gt=normaliseret til glødetab.

Variabel	YR(period)	YR(period × wb)	STAT(wb)	STAT(period × wb)	STAT(wb × d)	STAT(period × wb × d)	e_{ijklm}	TOTAL
Vægtfylde	11,8%	10,2%	11,0%	6,1%	2,5%	1,8%	10,3%	24,2%
Tørstof	0,0%	14,0%	37,5%	10,6%	10,7%	0,0%	12,7%	47,9%
Glødetab	0,0%	17,0%	142,2%	17,5%	18,9%	2,7%	15,7%	156,2%
Total N	0,0%	29,2%	143,7%	23,1%	17,8%	0,0%	27,1%	170,0%
Total P	0,0%	13,9%	69,3%	25,6%	15,1%	5,3%	16,7%	87,0%
Fe-P	47,8%	85,1%	0,0%	150,8%	19,2%	0,0%	67,2%	264,5%
GT (VV)	0,0%	10,0%	103,0%	7,8%	9,2%	0,0%	13,1%	108,3%
GT (vol)	3,4%	9,7%	83,0%	7,0%	2,7%	4,7%	16,6%	89,1%
TN (VV)	0,0%	21,7%	105,6%	14,7%	9,9%	0,0%	24,9%	121,9%
TN (vol)	2,9%	24,2%	86,5%	14,9%	7,6%	0,0%	27,7%	105,7%
TN (gt)	4,1%	18,0%	17,2%	9,1%	0,0%	0,0%	20,8%	36,6%
TP (VV)	5,9%	10,3%	53,4%	15,9%	11,1%	0,0%	18,2%	66,0%
TP (vol)	22,8%	14,3%	45,1%	14,7%	11,0%	5,4%	21,1%	67,8%
TP (gt)	0,0%	14,5%	41,2%	7,1%	8,7%	0,0%	17,9%	52,1%
Fe-P (VV)	41,3%	74,6%	67,7%	81,3%	12,7%	0,0%	64,4%	214,4%
Fe-P (vol)	53,9%	69,8%	56,8%	73,3%	13,5%	0,0%	65,8%	205,0%
Fe-P (gt)	54,6%	76,0%	37,6%	53,7%	13,9%	0,0%	66,7%	181,9%

For vægtfylde er den samlede tilfældige variation $\pm 24,2\%$, og den består hovedsageligt af år-til-år variation (samlet og mellem vandområder), variation mellem stationer indenfor vandområder og variation mellem replikater (alle mellem 10,2 og 11,8%). Derimod ændrede variationen mellem stationer sig ikke væsentligt over de to perioder, ligesom dybdefordelingen i vægtfylde ikke ændrede sig væsentligt mellem stationer eller mellem stationer over tid (1,8 til 6,2 %).

For tørstof var billedet noget anderledes, idet rumlig variation mellem stationer dominerede ($\pm 37,5\%$). Variationen mellem stationer ændrede sig også over tid ($\pm 10,6\%$), formentlig på grund af mindre variationer i de eksakte prøvetagningslokationer. Der var også tidlige forskydninger mellem vandområder ($\pm 14,0\%$), foruden at dybdefordelingen varierede mellem stationer. Samlet var den tilfældige variation i tørstof højere end for vægtfylde.

Glødetab varierede kraftigt mellem stationer indenfor vandområder ($\pm 142,2\%$), hvilket udgjorde den største kilde til den samlede tilfældige variation ($\pm 156,2\%$). Desuden var der tilfældig variation mellem år og vandområder ($\pm 17,0\%$), stationer og perioder ($\pm 17,5\%$) og dybdefordelingen mellem stationer ($\pm 18,9\%$). Der var tilsvarende mønstre mellem de tilfældige variationer for total N og P, dog med lidt mindre variation mellem stationer for total P ($\pm 69,3\%$). Denne generelle overensstemmelse indikerer en overordnet stærk kobling mellem C, N og P i sedimentpuljerne. Samlet variation for total P ($\pm 87,0\%$) var dog noget lavere end for total N ($\pm 170,0\%$).

Jernbundet P var den mest variable måling med en samlet variation på $\pm 264,5\%$, hvoraf det største bidrag kom fra variation mellem stationer og perioder ($\pm 150,8\%$) og ikke mellem stationer alene. Dette betyder, at variationen mellem stationer ikke er konstant men varierer over tid i langt større grad end for de andre målevariable. Puljen af jernbundet fosfor er afhængig af sedimentets redoxniveau, og er derfor mere dynamisk end de øvrige puljer. Dette ses ligeledes af den høje variation mellem år ($\pm 47,8\%$) og år og vandområder ($\pm 85,1\%$). Endelig var der et mindre bidrag fra forskelle i dybdefordelingen af jernbundet P mellem stationer inden for et vandområde ($\pm 19,2\%$). Overordnet indikerer dette, at

tidlige variationer var dominerende for jernbundet P, i modsætning til de andre variable, hvor rumlig variation var størst.

For de afledte variable for glødetab var den mindste samlede variation i forhold til volumen ($\pm 89,1\%$). Det betyder, at angives glødetabet i forhold til våd vægt og tørvægt introduceres yderligere variation. For næringsstoffer medfører angivelse i forhold til glødetab en væsentlig reduktion i den samlede usikkerhed – især for kvælstof. Det er dog værd at bemærke, at mængden af næringsstoffer angivet i forhold til henholdsvis volumen og glødetab udtrykker to forskellige ting (samlede puljer af næringsstof når der relateres til volumen, og indholdet af næringsstoffer i det organiske stof når der relateres til glødetab), og at det derfor er vigtigt at behandle dem hver for sig. For analyser af styrken i overvågningsprogrammet (næste afsnit), undersøges derfor følgende otte variable:

- Glødetab i forhold til volumen (GT (vol))
- Glødetab i forhold til tørstof (GT (gt))
- Total N i forhold til volumen (TN (vol))
- Total N i forhold til glødetab (TN (gt))
- Total P i forhold til volumen (TP (vol))
- Total P i forhold til glødetab (TP (gt))
- Jernbundet P i forhold til volumen (FeP (vol))
- Jernbundet P i forhold til glødetab (FeP (gt))

5.2 Bestemmelse af sensitivitet i nuværende program

For at vurdere, hvor store ændringer det er muligt at bestemme med det nuværende overvågningsprogram, er sandsynligheden for at bestemme en signifikant ændring mellem to seks-årige perioder undersøgt for ændringer i sedimentvariable fra 0 til 20%. Ændringer på 0% til 20% i puljerne er valgt på baggrund af forskningslitteraturen inden for området. Forudsætningerne for analysen er, at der undersøges 27 vandområder, hver med to stationer, over to seks-årige perioder. Hvert vandområde undersøges kun to år ud af de seks år i perioden. Dette er inden for den afsatte ressource med max 18 stationer pr. år.

Sandsynligheden for at finde en signifikant middelforskel mellem de to seks-årige perioder på tværs af alle områder er bestemt ud fra Monte Carlo simuleringer ($n=1000$) af ovenstående model med de estimerede varianser (Tabel 5.1) og relative ændringer i middelkoncentrationen mellem de to perioder. Testen er udført som en ensidigt test med 95% konfidens, og antallet af signifikante ændringer fra modellen i forhold til antallet af simuleringer angiver styrken, dvs. sandsynligheden for at detektere en signifikant ændring af en given størrelse. Bemærk at sandsynligheden er lig type I fejlen ($\sim 5\%$), når der ikke er nogen relativ ændring. Sagt på en anden måde, så vil der statistisk være 5% sandsynlighed for at detektere en signifikant ændring, selvom den ikke findes. Normalt betragtes en styrke (dvs. sandsynlighed for detektion af signifikant ændring) på mindst 80% som acceptabelt.

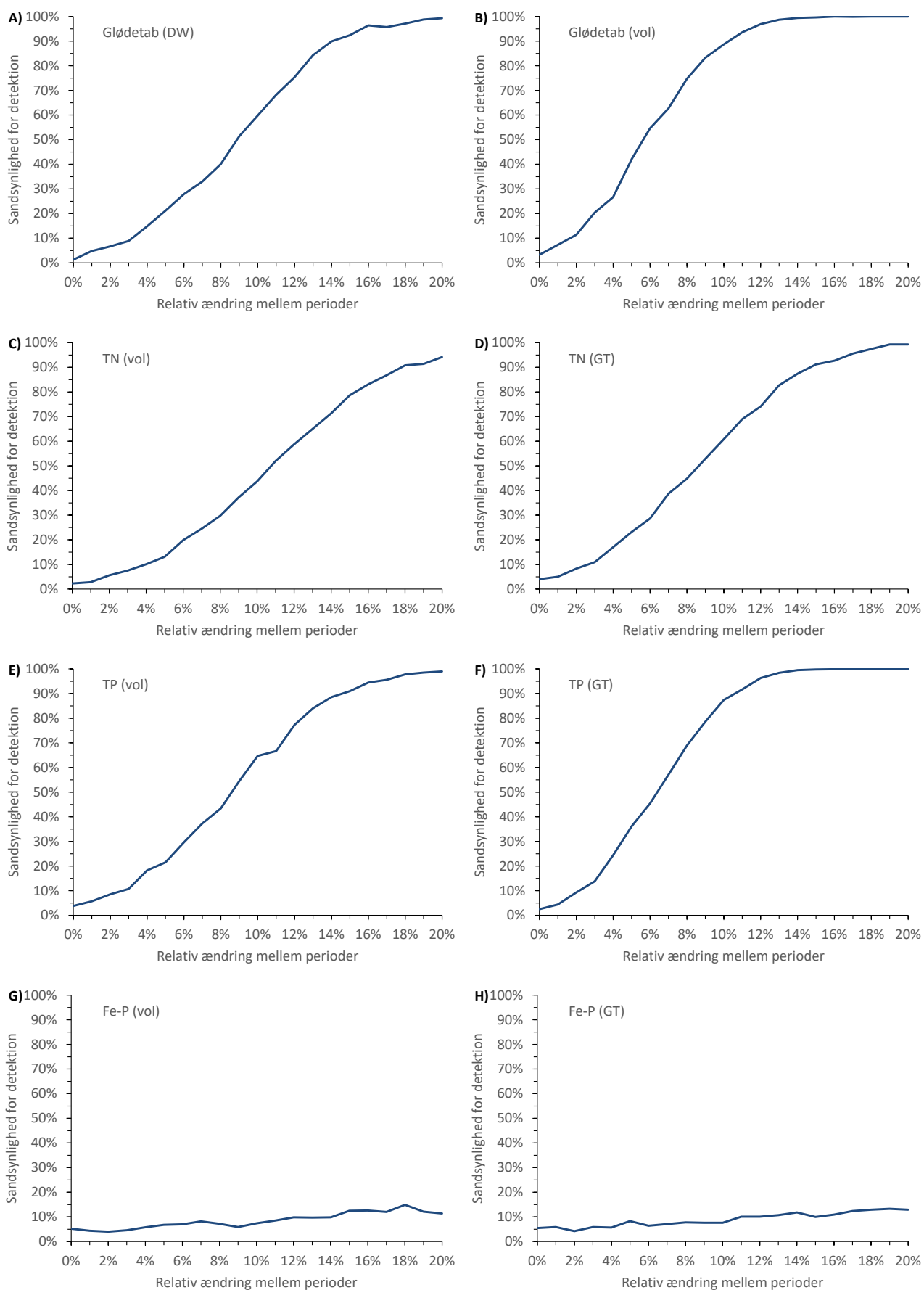
For glødetab normaliseret til tørstofindhold skal der være en relativ ændring på 13% for at opnå en styrke på mindst 80%, og ved en relativ ændring på 20% er styrken 99% (figur 5.2). Da glødetab normaliseret til volumen har mindre tilfældig variation, vokser styrken hurtigere ved stigende relativ ændring. Det vil for denne variabel være muligt at detektere en relativ ændring på 9% med en styrke på 83% sandsynlighed og ved en relativ ændring på 13% er styrken 99%.

For TN normaliseret til volumen skal den relative ændring være mindst 16% for at detektere en signifikant ændring mellem de to perioder med en styrke

på 83%, og for en relativ ændring på 20% er styrken 94%. Hvis TN normaliseres til glødetab, reduceres de tilfældige variationer (*Tabel 5.1*), hvilket umiddelbart forbedrer styrken i testen. Ved en relativ ændring på 13% er styrken 83%, og for en relativ ændring på 19% er styrken 99%. Umiddelbart kan det undre, at styrken ikke forbedres mere, når den totale spredning ændres fra 105,7% til 36,6% (*Tabel 5.1*). Det skyldes, at normaliseringen hovedsageligt reducerer den rumlige tilfældige variation, og kun reducerer den tidslige tilfældige variation i mindre grad. Da der samlet set bliver indsamlet prøver fra mange flere stationer end år, bliver antallet af år med prøvetagning kritisk for den statistiske test.

For TP normaliseret til volumen skal den relative ændring være mindst 13% for at detektere en signifikant ændring mellem de to perioder med 84%, og en relativ ændring på 19% vil kunne detekteres med 99% sandsynlighed. De tilfældige variationer reduceres, dog mindre end for TN, hvis TP normaliseres til glødetab. Dette medfører, at en relativ ændring på 10% kan detekteres med 87%, og en relativ ændring på 14% kan detekteres med 99% sandsynlighed. Dermed er der større sandsynlighed for at detektere en ændring over tid for TP end TN, på trods af en større total spredning (*Tabel 5.1*). Dette skyldes igen en mindre tilfældig variation mellem år for TP sammenholdt med TN, hvilket får betydning for at vurdere, om der er sket en signifikant ændring over tid.

Der var store tidslige og rumlige variationer i koncentrationen af jernbunden P, både for normalisering til volumen og glødetab (*Tabel 5.1*). De tilfældige variationer er så store, at det ikke er muligt at opnå en styrke på mindst 80% for relative ændringer mindre end 20%. Sandsynligheden for at detektere en ændring er aldrig højere end 15%, hvilket er meget lavt. Vurderet ud fra det generelle kurveforløb for de andre variable er et groft skøn, at der skal være en ændring på omkring 100% i jernbunden P for at kunne detektere en ændring med mindst 80% sandsynlighed.



Figur 5.2. Sandsynlighed for at detektere en relativ ændring mellem to perioder for de otte undersøgelsesvariable. Sandsynligheden er bestemt ved Monte Carlo simulering af den statistiske model for sedimentpuljer med de estimerede varianser (Tabel 5.1).

5.3 Diskussion af statistiske analyser

Ændringer i sedimentpuljer over tid kan analyseres ud fra målinger af glødetab, total kvælstof (TN), total fosfor (TP) og jernbunden P. Disse målinger foretages på tre indsamlede sedimentkerner, hvor de enkelte dybdeintervaller puljes med undtagelse af 1-2 cm, hvor der måles på hver af tre replikate sedimentkerner. Prøvetagningen i NOVANA giver mulighed for at bestemme variationen i sedimentpuljerne over tid og rum.

Den samlede variation i de relevante variable varierer fra 87% op til 265%, hvor den rumlige variation er større end den tidslige variation (*Tabel 5.1*). Variationen i næringsstofpuljerne er noget større end variationen i TN og TP målt i vandfasen (~30-50%; *Carstensen m.fl. 2024*), hvilket skyldes en større heterogenitet i sedimentet end i vandfasen. Dette betyder, at det er lettere at detektere ændringer i vandfasen end i sedimentet, såfremt mængden af data og den procentuelle ændring er ens. Der indsamles dog væsentlig færre sedimentkerner end vandprøver, og derfor vil analyser af ændringer over tid i sedimentpuljerne være behæftet med større usikkerhed sammenlignet med ændringer i vandfasen. Men da ændringerne i sedimentpuljerne ikke nødvendigvis følger ændringerne i vandfasen, er det interessant at overvåge sedimentpuljerne.

Der findes kun få studier af ændringer i sedimentpuljer over tid, og disse er hovedsageligt fra havområder, som historisk har været kraftigt påvirket af byspildevand, og hvor der er sket en stor ændring i tilførslen af næringsstoffer. *Testa m.fl. (2022)* observerede fald på omkring 20% i partikulært kulstof og kvælstof og 50% for partikulært fosfor for et vandområde i Chesapeake Bay efter reduktioner i tilførslen af kvælstof og fosfor på henholdsvis 80% og 90%. *Tucker m.fl. (2014)* observerede fald på omkring 30% i total kulstof (TOC) for tre ud af fire stationer i den ydre del af Boston Harbor, efter at spildevandet blev udledt længere væk fra kysten, hvorimod der ikke var nogen ændring på stationen i den inderste del af havnen. Til sammenligning er de fleste af de danske fjorde hovedsageligt påvirket af diffuse kilder, hvor ændringen i tilførslerne af næringsstoffer har været noget mindre. Det vurderes derfor, at en potentiel ændring i sedimentpuljerne vil være noget mindre end for de to studier og formentlig lavere end den 20% ændring, som er anvendt i simuleringstudiet. Til sammenligning undersøgte *Valdemarsen m.fl. (2014)* sedimentkerner fra Odense Fjord over to år, hvor mængden af organisk kulstof faldt med 3-5%. Det blev vurderet, at 43-95% af kulstoffet i sedimentet var svært omsætteligt, hvilket gør det vanskeligt at detektere en ændring.

Dette studies simuleringer af et overvågningsprogram sammenligneligt med det hidtidige NOVANA-program for sedimentpuljer viser, at ændringer skal være omkring 10-15% for at kunne detekteres med tilstrækkelig sikkerhed. Hidtil er der ikke registreret nogen signifikante ændringer over tid (*Høgslund m.fl. 2018*), hvilket indikerer, at den potentielle ændring fra 1999-2003 til 2017-2023 formentlig er noget mindre. Den forventede ændring afhænger af, hvilke perioder der sammenlignes. Den største ændring i tilførslen af kvælstof og specielt fosfor skete i årene før 1999, hvilket betyder, at ændringer i den let omsættelige pulje formentlig er sket før overvågningen af sedimentpuljerne startede. Den forholdsvis lave omsætning af kulstof i sedimentet over to år (*Valdemarsen m.fl. 2014*), og dermed formentlig også kvælstof og fosfor, betyder, at der er store puljer af kulstof, kvælstof og fosfor, som kun langsomt omsættes i sedimentet. Til gengæld vil en fysisk forstyrrelse af sedimentet stimulere omsætningen, hvilket *Lønborg m.fl. (2024)* påviste ved at simulere effekten af trawling på sedimentkerner. Det vides dog ikke, om nogle af de undersøgte stationer i dette studie har været påvirket af bundtrawling eller anden fysisk forstyrrelse.

Sandsynligheden for at detektere en ændring stiger jo større ændringen er. Det vil derfor være vigtigt at fokusere på de vandområder og stationsområder, hvor ændringen forventes at være størst. Det vil typisk være sedimentationsområder med ringe resuspension fra vind og bundslæbende redskaber.

Sandsynligheden for at detektere en ændring vokser også med antallet af prøvetagninger. Sedimentpuljerne varierer meget i tid og rum, og det vil være vigtigst at fokusere på de variationer, som begrænser præcisionen på middelværdierne for de to perioder, som sammenlignes. I analysen af NOVANA-data og i simulationen indgår ca. 50 stationer, hvorimod der kun er henholdsvis tre og seks års data for de to perioder. Ved en statistisk test for ændring mellem de to perioder indgår varianserne for $YR(period)_{il}$, $YR(period \times wb)_{ijl}$, $STAT(period \times wb)_{ijm}$ og $STAT(period \times wb \times d)_{ijkm}$ foruden residualvariationen (e_{ijklm}). Varianskomponenterne $YR(period)_{il}$ og $YR(period \times wb)_{ijl}$ beskriver tilfældig tidslig variation indenfor perioder og $STAT(period \times wb)_{ijm}$ og $STAT(period \times wb \times d)_{ijkm}$ beskriver ændringer i rumlig variation mellem perioder. De andre varianskomponenter i den statistiske model indeholder ikke *period* og indgår derfor ikke i den statistiske test for forskel mellem de to perioder. For alle sedimentvariable gælder, at de tidslige variationer bidrager med størst varians til testen af forskel mellem perioder, hvilket skyldes de relativt få år med data i forhold til de mange stationer. Det vil derfor øge styrken i testen af have prøvetagninger i flere år inden for hver periode. Det kan derfor være en fordel at øge frekvensen af prøvetagningen og fokusere prøvetagningen til de områder, hvor ændringen mellem de to perioder forventes at være størst.

6 Forslag til prøvetagningsstrategier

I den marine overvågning er der generelt både et ønske om at overvåge geografiske variationer i økosystemkomponenter og også et ønske om at følge eventuelle ændringer i økosystemkomponenterne over tid. Analysen af variansen i det nuværende sedimentovervågningsprogram samt simuleringerne viser, at tilrettelæggelsen af sedimentovervågningen, inden for de afsatte ressourcer kræver, at der prioriteres mellem viden om geografisk variation og detektion af ændringer over tid.

Herunder diskuteres tre prøvetagningsstrategier med forskelligt fokus. Mulighederne for at øge præcisionen af programmets resultater ved at justere prøvetagningsstrategien behandles med udgangspunkt i variansanalysen (*tabel 5.1*).

Analysen viste, at den tilfældige variation i dybdeprofilen mellem stationer inden for et vandområde og en overvågningsperiode var lille (max 5,4 %). Præcisionen i programmet forbedres derfor ikke ved at øge replikation af dybdeprofilen, så den nuværende strategi med opskæring af tre sedimentkerner, hvor dybderne puljes undtagen for 1-2 cm, bør bibeholdes uanset, hvilken prøvetagningsstrategi der vælges.

6.1 Fokus på tidlige ændringer i sedimentets indhold af organisk stof og næringsstoffer.

Sedimentets puljer af organisk stof, N og P påvirkes af eutrofieringsniveauet i vandsøjlen, som afhænger af tilførslen af organisk stof, N og P fra land. Samtidig har frigivelse af næringsstoffer fra sedimentet betydning for næringsstofftilgængeligheden i vandsøjlen. Det giver derfor værdifuld viden om økosystemet at følge de tidlige ændringer i sedimentets næringsstofpuljer, både når det handler om afviklingen af de forhøjede næringsstofpuljer, der blev opbygget i havbunden, før N og P tilførslen blev reduceret i 1990'erne, og hvis der indføres nye markante reduktionstiltag, idet recirkuleringen af N og P fra sedimentet potentielt kan forsinke den positive effekt af en reduktion i næringsstofftilførslen fra land.

Det er nødvendigt at øge præcisionen i det nuværende prøvetagningsdesign for at kunne følge ændringer i sedimentets puljer, især hvis programmet skal detektere ændringer i puljen af N i sedimentet. Her skal der være en ændring på minimum 16 % imellem to perioder, for at ændringen kan ses i det nuværende program (*figur 5.2*). Præcisionen kan mest effektivt øges ved at øge antallet af år, hvor hver station prøvetages inden for en periode. Idet de tidlige variationer bidrager med mest tilfældig variation til testen af forskel i sedimentvariable mellem perioder i det nuværende prøvetagningsdesign (*tabel 5.1*). Dette skyldes de relativt få år med data i forhold til de mange stationer, inden for hver periode, dvs. at prøvetagningsfrekvensen bør øges for at øge styrken i testen af forskelle mellem perioder.

Hvis prøvetagningsfrekvensen øges, betyder det at færre stationer kan indgå i programmet. Indsatsen bør samles i udvalgte vandområder, der tidligere har indgået i sedimentovervågningen, så der foreligger "baseline" data. Stationer og vandområder bør vælges ud fra en forventning om, hvor man vil se de største ændringer ved en ændring i eutrofieringsstatus og dække vandområder med varierende dybder og opholdstider for vandet.

Man kan fx benytte en prøvetagningsstrategi, hvor alle stationer i programmet prøvetages hvert år. Det vil være muligt inden for de opstillede rammer (*afsnit 1*), hvis de følgende otte områder udvælges:

Flensborg Fjord, Horsens Fjord, Vejle Fjord, Odense Fjord, Roskilde Fjord, Aarhus Bugt, Sydfynske Øhav samt Limfjorden repræsenteret ved stationer i Skivefjord, Løgstør Bredning, Kås Bredning og Thisted Bredning.

Dvs. at prøvetagning i områderne Nibe-Gjæld Bredning, Ringkøbing Fjord, Nissum Fjord, Mariager Fjord, Nordlige Lillebælt, Øresund og Storebælt ikke fortsættes.

Inden for de otte områder er der udvalgt 18 stationer (*tabel 6.1*), hvilket er det maksimale antal stationer, der kan besøges om året inden for de givne rammer. Stationerne er valgt blandt de eksisterende sedimentstationer, hvor der, vurderet ud fra sedimentets vægtfylde og indhold af organisk stof, forekommer sedimentation. Desuden danner overvejelser om varierende vanddybder, iltsvindsforhold, vandets opholdstid, afstand til land og adgang til overvågningsdata i vandsøjlen ved stationerne baggrund for udvælgelsen af stationerne.

Table 6.1. Forslag til 18 udvalgte stationer i et prøvetagningsprogram, hvor prøvetagningsfrekvensen øges til prøvetagning hvert år.

tednavn	Stations ref	Sted ID	Tidligere prøvetagninger											ialt
			1999	2003	2004	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	
Skive Fjord	VIB3727-00001	93740007	1	1		1		1			1			5
Thisted Bredning	VIB3723-00001	93760006	1	1					1	1	1			5
Kås Bredning	VIB3705-00001	93750006	1	1					1	1	1			5
Løgstør-Livø Bredning	VIB3708-00001	93730002	1	1					1	1	1			5
Kalø Vig, ydre del	ARH170002	94410004	1	2				1	1					5
Aarhus Bugt	ARH170006	94400007	1	2				1	1					5
Horsens Fjord	VEJ0006089	94330003	1	1									1	3
Husodde	VEJ0005790	94330002	1	1		1	1						1	5
Vejle Fjord	VEJ0004273	95130002	1	1				1	1					4
Vejle Fjord	VEJ0003772	95130005	1	1									1	3
Nordlige Lillebælt	VEJ0006870, FYN6100014	94300001	1	1					1	1				4
Nakkebølle Fjord	FYN0018361	96510005	1	1					1	1				4
Ringgårdsbassin, åbne del	FYN6500051	96510001	1	1			1	1					1	5
Flensborg Fjord, åbne del	SJYKFF5	95700001	1	1		1	1					1		5
Okseøerne	SJYKFF2	95710002	1	1		1	1					1		5
Odense Fjord, ydre del	FYN6900803	94230017	1	1										2
Odense Fjord, ydre del	FYN6900804	94230018	1	1		1	1						1	5
Roskilde Bredning	ROS60	93220011	1		1				1	1				4

6.2 Fokus på rumlig dækning af variationen i sedimentets indhold af organisk stof og næringsstoffer.

Data fra de tidligere sedimentovervågningsprogrammer har ikke den fornødne styrke til at dokumentere eventuelle forskelle i organisk stof, N og P mellem vandområder (*Hansen og Høgslund 2023*). Det underbygges i analysen af sedimentpuljernes variation. Der viser stor tilfældig variation mellem stationer inden for et vandområde, især for glødetab (142,2 %) og kvælstof (143,7 %) (*tabel 5.1*). Heterogeniteten i sedimentet gør således karakterisering af vandområdet sedimentpuljer meget afhængig af den specifikke placering af prøvetagningsstationerne.

Hvis programmet skal give viden om forskelle mellem vandområdernes sedimentpuljer kræver det derfor, at der tages prøver på flere stationer i de områder, der var en del NOVANA-programmet. Opprioritering af rumlig dækning inden for de afsatte ressourcer vil betyde nedsat prøvetagningsfrekvens, og dermed vil man ikke kunne følge de tidlige ændringer, og programmet vil derfor være fokuseret på en egentlig kortlægning.

Kortlægning af forskelle i vandområdernes sedimentpuljer giver ikke i sig selv økologisk relevant information om sedimentets påvirkning af vandsøjlen i vandområdet. Det er veldokumenteret, at der i mange tilfælde ikke er en sammenhæng mellem fx sedimentets indhold af organisk stof dvs. puljernes størrelse og omsætningshastigheden i sedimentet dvs. frigivelse og optag af stoffer mellem sediment og bundvand (fx *Jørgensen 1977*).

Der har været fokus på kortlægning af sedimentets indhold af kulstof i flere EU-projekter fx MPAEurope (2023-2027) (<https://mpa-europe.eu/the-euro-blue-carbon-database-at-first-glance>), hvor der arbejdes med at opbygge databaser med målte sedimentvariable og modellere sedimentets indhold af kulstof.

Kortlægning af forskelle mellem vandområder udføres mest effektivt med baggrund i viden om sedimentets mineralogiske sammensætning, afstand fra land mm., og at man med udgangspunkt i disse variable modellerer puljestørrelser af glødetab, N og P. Sedimentprøvetagningen vil i dette tilfælde anvendes til at validere og optimere modellen.

Overvågning med fokus på rumlig forskel i vandområdernes sedimentpuljer vil give begrænset information om områdets økosystem status uden mulighed for at følge ændringer i puljerne og dermed den bentisk-pelagiske kobling.

6.3 Fokus på effekter af fysisk forstyrrelse

Den hidtidige NOVA- og NOVANA-overvågning er tilrettelagt med henblik på at følge udviklingen i sedimentets indhold af organisk stof og næringsstoffer i relation til status for eutrofiering. I den nyere forskningslitteratur tegner der sig et billede af, at fysisk forstyrrelse påvirker sedimentets omsætning af både C og N og sedimentets iltningreserve, dvs. evne til at tilbageholde svovlbrinte (*Lønborg m.fl. 2024, De Borger m.fl. 2021, Ferguson m.fl. 2020, van de Velde 2017*). Det kan derfor være relevant for forståelsen af ændringer eller manglende ændringer i økosystemet at indsamle viden om effekter af fysisk forstyrrelse på sedimentet. Det kan gøres ved at undersøge geografiske forskelle i sedimentet, der er udsat for forskellige trawlingintensiteter og/eller ved at følge ændringer i sedimentpuljer over tid i områder, hvor der er en forventning om at trawlingintensiteten mindskes eller øges.

Tilrettelæggelse af sedimentovervågning med fokus på fysisk forstyrrelse vil kræve en særskilt analyse af eventuel fysisk forstyrrelse af de eksisterende stationer, placering af nye stationer i forhold til intensiteten af det nuværende forstyrrelsesniveau samt placering af stationer ift. forventninger om ændringer i forstyrrelsesintensiteten, fx ved indførslen af trawlfrie zoner.

6.4 Konklusion

De tre overvågningsstrategier for marine sedimenter har hver sin berettigelse. Under de nuværende rammer og med de metoder, der anvendes p.t. i den marine overvågning, vil det være muligt at følge en strategi, der fokuserer på overvågning af tidlige ændringer (afsnit 6.1). Det vil dog være hensigtsmæssigt at inkludere mål for sedimentets evne til at tilbageholde svovlbrinte i overvågningen fx svovlbrintefrontens dybde. Simuleringerne viser, at målingerne af jernbundet fosfor er meget variable, og det vil derfor være meget lille sandsynlighed for at detektere tidlige ændringer for denne parameter, selv med et optimeret prøvetagningsprogram. Nyere forskning peger på, at fysisk forstyrrelse påvirker biogeokemien i sedimentet, men det fulde omfang af denne påvirkning er uklar. I forvaltningssammenhæng vil det være mest hensigtsmæssigt at etablere baseline-målinger i områder, hvor der er planlagte ændringer i fx trawlingsintensiteten eller tiltag til at nedbringe tilførslen af næringsstoffer.

7 Referencer

Boynton, W. R., Ceballos, M. A. C., Bailey, E. M., Hodgkins, C. L. S., Humphrey, J. L., & Testa, J. M. (2018). Oxygen and Nutrient Exchanges at the Sediment-Water Interface: a Global Synthesis and Critique of Estuarine and Coastal Data. *Estuaries and Coasts*, 41(2), 301-333.

De Borger, E., Tiano, J., Braeckman, U., Rijnsdorp, A.D., Soetaert K. (2021), Impact of bottom trawling on sediment biogeochemistry: a modelling approach, *Biogeosciences*, 18, 2539-2557

Carstensen, J., Murray, C.J., Lindegarth, M. (2024). Getting the errors right: The importance of partitioning sources of uncertainty for ecological indicators. *Ecological Indicators*, 167

Ferguson, A.J.P., Oakes, J., Eyre, B.D. (2020). Bottom trawling reduces benthic denitrification and has the potential to influence the global nitrogen cycle. *Limnology and Oceanography Letters*, 5, 237-245

Fossing H. 2018. Næringsstoffer i sediment TA nr. M23 v2. Teknisk Anvisning fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, Institut for Bioscience, Aarhus Universitet, 14 pp

Hansen J.W. & Høgslund S. (red.) 2023. Marine områder 2021. NOVANA. Aarhus Universitet, DCE- Nationalt Center for Miljø og Energi, 220 s. - Videnskabelig rapport fra DCE nr. 529.

Høgslund, S., Fossing, H. Carstensen, J. 2023. Microphytobenthic impact on benthic pelagic nutrient exchange in temperate shallow estuaries. *Estuarine, coastal and shelf science*. 292, 108475

Høgslund, S., Carstensen, J., Krause-Jensen, D. & Hansen, J.L.S. 2018. Sammenhænge i det marine miljø - Betydning af sedimentændringer. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 70 s. Videnskabelig rapport nr. SR323

Jørgensen, BB., Wenzhöfer, F., Egger, M. & Glud, RN. 2022: Sediment oxygen consumption: Role in the global marine carbon cycle. *Earth-Science Reviews* 228: 103987.

Jørgensen, B.B., Findlay, A. J. , Pellerin, A. (2019). The Biogeochemical Sulfur Cycle of Marine Sediments. *Frontiers in Microbiology*, 10, DOI 10.3389/fmicb.2019.00849

Jørgensen, B.B., (1996). Material flux in the sediment. I Eutrophication in Coastal Marine Ecosystems, Jørgensen, B.B. & Richardson, K. (red.). American Geophysical Union Washington DC USA.

Jørgensen B.B, (1977). The sulfur cycle of a coastal marine sediment (Limfjorden, Denmark), *Limnology and Oceanography*, 5, doi: 10.4319/lo.1977.22.5.0814.

- Kaas, H. & Markager S. (red.) 1998: Teknisk anvisning for marin overvågning. Danmarks Miljøundersøgelser.
- Kindeberg, T., Orberg, S. B., Rohr, M. E., Holmer, M., & Krause-Jensen, D. (2018). Sediment Stocks of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Danish Eelgrass Meadows. *Frontiers in Marine Science*, 5. doi:10.3389/fmars.2018.00474
- Knudsen-Leerbeck, H., Mantikci, M., Bentzon-Tilia, M., Traving, S. J., Riemann, L., Hansen, J. L. S., & Markager, S. (2017). Seasonal dynamics and bio-availability of dissolved organic matter in two contrasting temperate estuaries. *Biogeochemistry*, 134(1-2), 217-236.
- Krause-Jensen D, Carstensen J, Nielsen SL, Dalsgaard T, Christensen PB, Fossing H, Rasmussen MB (2011) Sea bottom characteristics affect depth limits of eelgrass *Zostera marina*. *Mar Ecol Prog Ser* 425:91-102.
- Leiva-Duenas, C., Holbach, A. Göke, C., Carstensen, J. & Krause-Jensen, D. 2023. Potential effects of trawling-free zones on carbon stocks of Danish eelgrass meadows. – Scientific briefing no. 2023 | 14 https://dce.au.dk/fileadmin/dce.au.dk/Udgivelser/Notater_2023/N2023_14.pdf
- Lønborg, C., Markager, S., Herzog, S.D., Carreira, C., Høgslund, S. (2024). Impacts of anthropogenic resuspension on sediment organic matter: An experimental approach. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 310,
- Nielsen, L. P, Jensen, H.M., Andersen, P., Rasmussen, M.B. (1990). Overvågning af sedimenter i Limfjorden: Redegørelse om sedimentomsætning og forslag til metoder. LKF-rapport 52
- Testa, J.M., W.R. Boynton, C.L.S. Hodgkins, A.L. Moore, E.M. Bailey & J. Rambo. (2022) Biogeochemical states, rates and exchanges exhibit linear responses to large nutrient load reductions in a shallow, eutrophic urban estuary. *Limnology and oceanography*, 67, 739-752.
- Tucker, J., Giblin, A. E., Hopkinson, C. S., Kelsey, S. W., & Howes, B. L. (2014). Response of benthic metabolism and nutrient cycling to reductions in wastewater loading to Boston Harbor, USA. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 151, 54-68.
- Valdemarsen, T., Quintana, C. O., Kristensen, E., & Flindt, M. R. (2014). Recovery of organic-enriched sediments through microbial degradation: implications for eutrophic estuaries. *Marine Ecology Progress Series*, 503, 41-58. doi:10.3354/meps10747
- van de Velde, S., Van Lancker, V., Hidalgo-Martinez, S., Berelson, W.M., Meysman, J.R. (2018). Anthropogenic disturbance keeps the coastal seafloor biogeochemistry in a transient state. *Scientific Reports* 8, 5582. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23925-y>

NOVANA-OVERVÅGNING AF NÆRINGSSTOFFER I MARINE SEDIMENTER

Indspil til optimering af overvågningsprogram

Det marine sediment påvirker iltbalancen i bundvandet, forekomsten af giftig svovl-brinte og frigivelsen af næringsstoffer til vandsøjlen. Det udgør det fysiske substrat, hvor bundplanter forankres og hvor bundfaunaen har sit levested, og sedimentet indgår bl.a. derfor i NOVANA overvågningen. Svovlbrinte overvåges ikke i det nuværende overvågningsprogram men kan forholdsvis let tilføjes til programmet. Svovl-brinte produceres i marine sedimenter, og er skadelig for bundfauna og rodfæstede planter, fx ålegræs. Analyser af data fra den tidligere overvågning af marine sedimenter viste, at der skal være relativt store ændringer i sedimentvariable, før ændringerne kan detekteres med tilstrækkelig statistisk sikkerhed. Prøvetagningsprogrammet bør derfor optimeres, hvis man ønsker at følge ændringer i sedimentet over tid. Analyserne viste at en øget prøvetagningsfrekvens vil være den mest effektive måde at forbedre programmet. Ud fra rammerne i den kommende sediment-overvågning foreslås prøvetagning på 18 stationer, der skal besøges hvert år, mod tidligere 28 stationer, som blev besøgt to gange over en femårig periode. Forslaget til placering af sedimentstationer i denne rapport tager ikke højde for fysisk forstyrrelse af havbunden. Nyere forskning peger på, at fysisk forstyrrelse påvirker sedimentkemi, og det vil være hensigtsmæssigt, at etablere baseline-målinger i områder, hvor der er planlagte ændringer i fx trawling-intensiteten.