

Hvornår glemmer fjordbunden sin fortid?

Er det muligt for vore fjordes sedimenter at slippe af med den historiske organiske belastning på naturlig vis? Det er jo afgørende for, om disse værdifulde kystnære områder igen kan oppebære udbredte bevoksninger af rodfæstede planter som ålegræs.

GARY BANTA, ERIK KRISTENSEN,
THOMAS VALDEMARENSEN, JENS BORUM,
ANNE ULDAHL, ANE L. RAUN, CINTIA O.
QUINTANA & MOGENS FLINDT

I løbet af mere end 50 år med voldsom eutrofiering er en stor mængde organisk stof blevet ophobet i sedimenterne på bunden af vore fjorde. Ophobningen skyldes en næringsstoffedt opløst opløst plankton og hurtigvoksende makroalger. En stor del af denne produktion af organisk stof er ikke blevet omsat, og er i stedet blevet ophobet i sedimentet/1/. Dette er problematisk, idet organisk berigede sedimenter er uegnet substrat til forankring af ålegræs/2/ og makroalger.

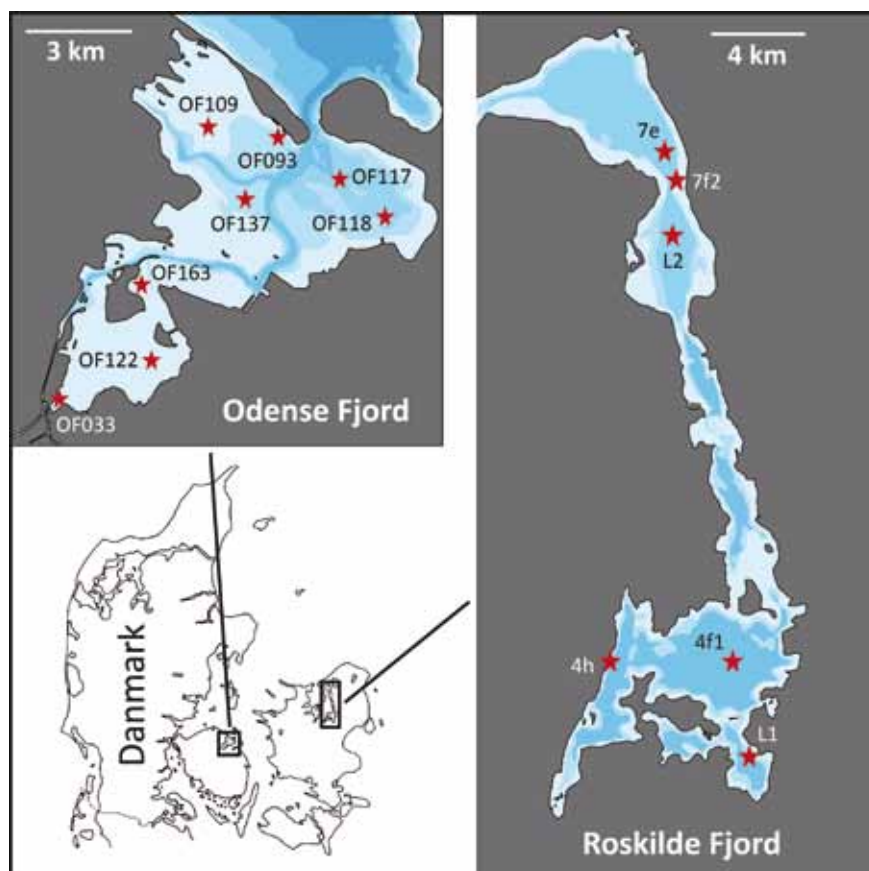
Det organiske stof skal "brændes af"

Næringsstoffudledninger til danske fjorde er blevet gradvist mindre siden starten af 1990'erne, men det ophobede organiske stof repræsenterer en hukommelse – en dårlig samvittighed – om man vil, der i lang tid efter faldet i næringsstoffbelastningen stadigvæk fastholder en dårlig økologisk tilstand. Mængden af organisk stof skal derfor mindskes for at genskabe gode levevilkår for flora og fauna. Den eneste måde dette kan opnås, er at vente på, at det organiske stof bliver omsat og nedbrudt ved mikroorganismers og bunddyrs hjælp. Vilkårene for at "brænde" det organiske stof af er imidlertid dårlige, fordi den største del af sedimentet er anoksisk (iltfrit). Anaerob omsætning er meget langsom og efterlader for det meste giftige stofs kiftprodukter, der kan hæmme vækst og overlevelse af fauna og flora, der ellers kunne være med til at accelerere omsætningen ved at ilte sedimentet /3/. Men hvor lang tid vil det tage at få omsat det organiske stof og få genskabt tidligere tiders fjordbund, og hvordan finder man svaret?

Hvad gjorde vi?

Intakte sedimentkerner blev indsamlet fra en række lokaliteter i Odense og Roskilde Fjord (Fig. 1). De undersøgte lokaliteter dækkede hele spektret fra lavt (< 1 m) vand med sandet sediment og lavt organisk indhold til dybt (> 6 m) vand med organisk beriget, finkornet mudder eller silt (Tabel 1). De indsamlede kerner blev anbragt i bassiner med fjordvand ved 15 °C. Umiddelbart efter indsamlingen blev rørene holdt iltfrie i nogle dage for at dræbe bunddyr, så kun den mikrobielle nedbrydning var aktiv over tid uden andre påvirkninger. Derefter blev kernerne placeret

i mørke med rigelig iltforsyning og uden yderligere tilførsel af organisk stof i hele forsøgets varighed (400 dage). I løbet af eksperimentet blev en del af kernerne skåret i skiver til måling af sedimentets egenskaber (vand- og organisk indhold). Nogle før og efter billeder af sedimentet ses i figur 2. Kernernes totale mikrobielle omsætning i form af sedimentets iltoptagelse blev målt med hyppige intervaller i hele perioden. Selv om en stor del af omsætningen foregik uden ilt, gav den efterfølgende anledning til et iltforbrug, fordi stofs kiftprodukter fra de iltfrie processer blev iltet ved sedimentoverfladen. Den anaerobe



Figur 1. Lokaliteter i Odense (venstre) og Roskilde Fjord (højre) hvor sedimentkerner blev indsamlet i 2009 (Odense) og 2010 (Roskilde).

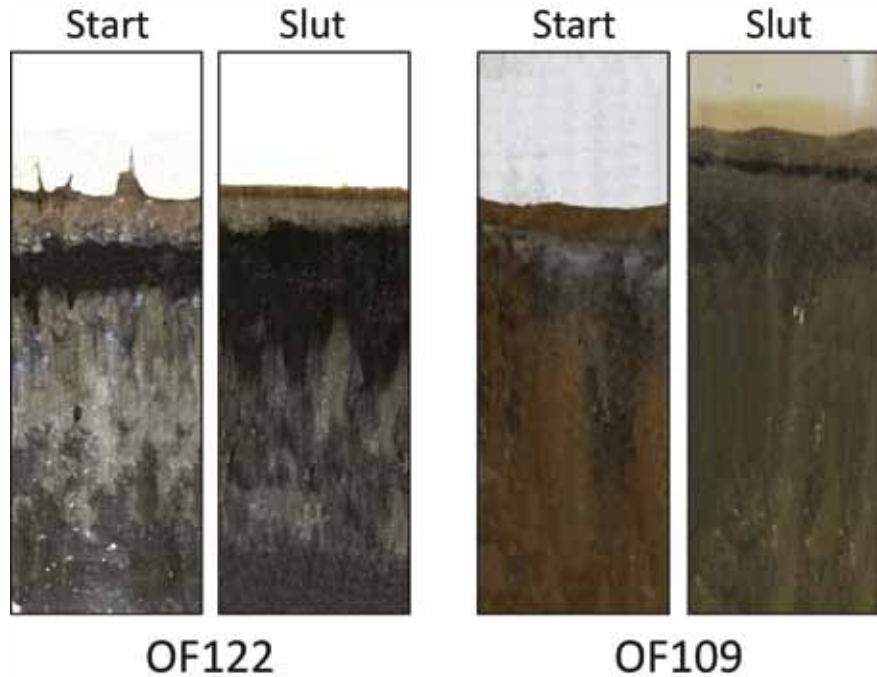
mikrobielle omsætning i den iltfrie del af sedimentet blev desuden målt i 3 udvalgte dybder ved lukkede "jar" forsøg, hvor udviklingen af kuldioxid blev fulgt i de forskellige sedimentlag over tid.

Vi gør opmærksom på, at vort forsøg ikke afspejler de virkelige forhold på bunden af fjordene. For det første blev sedimentkernerne ikke tilført nyt organisk stof i løbet af forsøgsperioden, hvorimod sedimenter i vores fjorde og kystnære områder kontinuerligt får tilført nyt organisk stof. Derfor overestimerer vi den tid, det tager for mikroorganismerne at fjerne det organiske stof i naturen. På den anden side overestimerer vi tiden nedbrydning vil tage ved indledningsvist at slå bunddyrene ihjel. Det er således velkendt, at bundlevende dyr stimulerer mikrobielle nedbrydningsprocesser ved at øge ilttilførslen gennem graveaktivitet og ventilering af deres gange. Samlet set skønner vi dog, at vort forsøg giver pålidelige mål for hvor hurtigt organisk stof kan nedbrydes i sedimenterne.

Udviklingen i mikrobiel nedbrydning af organisk stof

Alle sedimenttyper fandtes i begge fjorde, men den største variation i sedimentforhold fandtes i Roskilde Fjord. På trods af denne variation, var det mikrobielle iltoptag over hele forsøgets varighed forbavsende ens på alle lokaliteter og i begge fjorde (Fig. 3). I starten af forsøget var iltforbruget højt og varierede med op til en faktor 4 mellem sedimenttyperne. Der var mod forventning ikke nogen klar sammenhæng mellem iltforbruget i starten og sedimentets organiske indhold, hvilket tyder på en forholdsvis lavere nedbrydelighed i organisk berigede sedimenter. Efter det høje niveau i starten faldt iltforbruget med 50-80% indenfor nogle få uger til nogenlunde stabile niveauer for alle sedimenttyper. Generelt var iltforbruget højere i Roskilde Fjord end i Odense Fjord. Det er dog bemærkelsesværdigt at iltoptagelsen ved forsøgets afslutning kun varierede med en faktor 2 (ca. 10-20 mmol O₂ pr. m² pr. d) mellem alle stationer i de to fjorde.

Det høje og nogenlunde ens iltforbrug i starten indikerer, at alle sedimenterne på dette tidspunkt havde omtrent samme pulje af letomsætteligt organisk stof. Uden ny organisk tilførsel blev den letomsættelige pulje nedbrudt i løbet af få uger. Overraskende nok var dette mønster ens for både organisk fattigt sand og organisk rigt silt. Derefter udviste sedimenterne en meget konstant og lav omsætning drevet af sværtnedbrydelige organiske puljer. Da denne puljes størrelse varierer meget mellem sedimenttyperne, må nedbry-



Figur 2. Billeder af sedimentet fra to lokaliteter i Odense Fjord i starten af forsøget og efter de var holdt for 600 dage unde lys og tilførsel af ny organisk stof.

deligheden være større i organisk fattigt sand end organisk rigt silt. Der synes også, at være en forskel mellem de to fjorde, idet iltoptagelsen for alle sedimenttyper til slut var noget lavere i Odense Fjord (~10 mmol O₂ pr. m² pr. d) end i Roskilde Fjord (13-19 mmol O₂ pr. m² pr. d).

Mikrobiel nedbrydning i iltfrit sediment

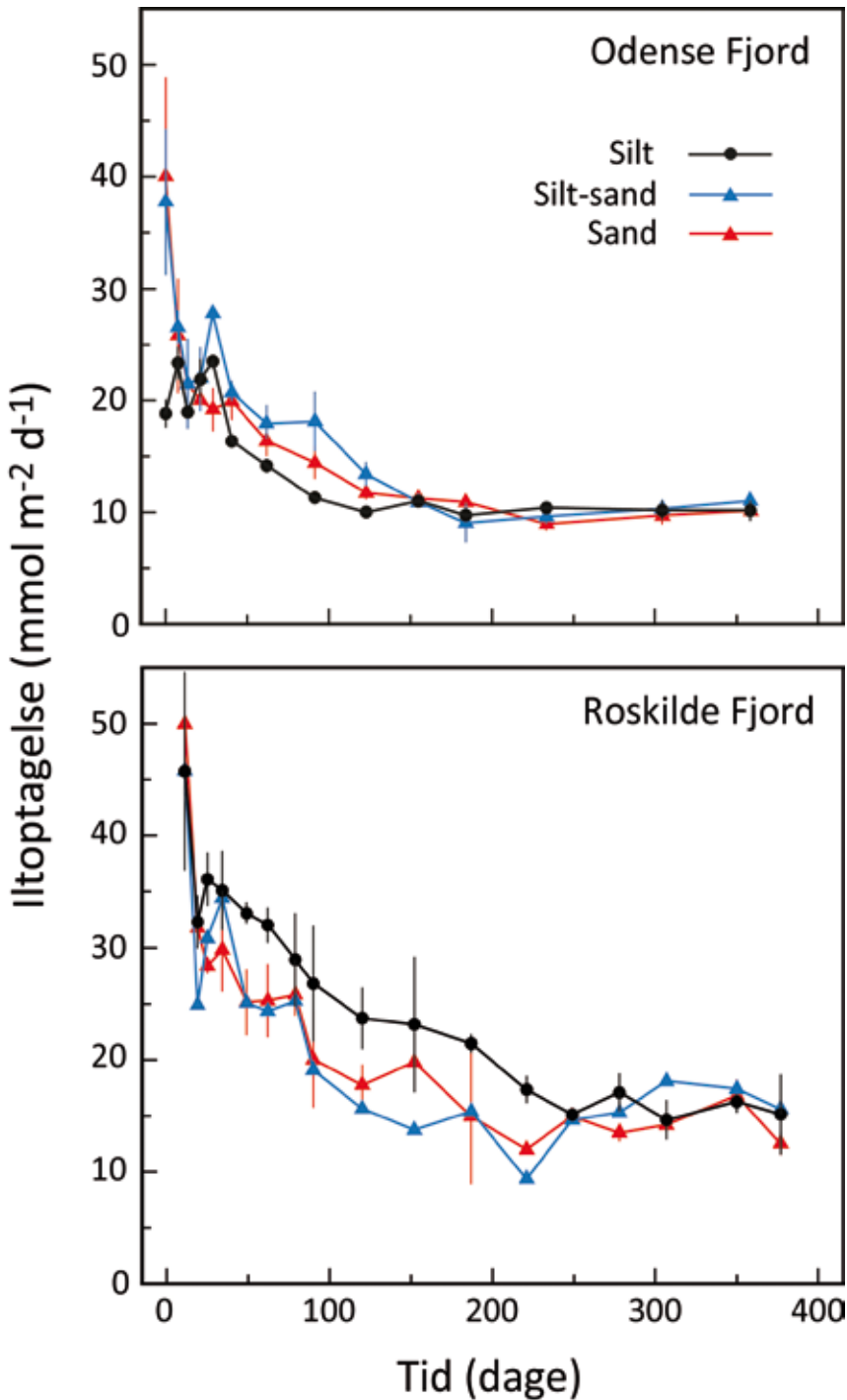
Vore målinger af den anaerobe nedbrydning fra "jar" forsøgene understøtter målingerne af iltoptagelsen. I de enkelte sedimentlag faldt nedbrydningsaktiviteten hurtigt over tid, og den stabiliserede sig herefter på et lavt niveau efter blot nogle få måneder. Det samme mønster forekom i både sandede og finkornede sedimenter (Fig. 4). På de fleste lokaliteter faldt nedbrydningen ned gennem sedimentet

ved forsøgets start, men til slut var der ikke længere nogen tydelig variation at spore med dybden. Det betyder, at det mest markante fald foregik i de øverste sedimentlag, hvor indholdet af letomsætteligt organisk stof jo gerne er størst.

Den arealmæssige nedbrydning beregnet på baggrund af kuldioxidannelsen i de enkelte sedimentlag til 10 cm dybde svarede til et arealbaseret iltoptag på 5-25 mmol pr. m² pr. d. Dette er i god overensstemmelse med nedbrydningen målt direkte på de intakte sedimentkerner i den stabile slutfase af forsøget. Det betyder jo, at hovedparten af omsætningen i sedimentet foregår anaerobt (se også de mørke, reducerede områder i figur 2). Hvis vi ikke indledningsvist havde dræbt alle bunddyrene, ville deres aktiviteter holde større dele af sedimentet iltet, og derved øge

Table 1. Sedimentegenskaber (vand- og organisk indhold) i de forskellige sedimenttyper i de to fjorde.

Start sediment			
Fjord	Sediment type	Vand indhold	Organisk indhold
		%	%
Odense	Silt	31-59	2,4-4,7
	Silt-sand	24-62	1,7-6,8
	Sand	17-67	0,8-4,7
Roskilde	Silt	69-86	14,1-25,4
	Silt-sand*	45-62	1,3-10,3
	Sand	15-23	0,2-0,8



Figur 3. Sedimentets iltoptagelse målt jævnligt over en periode på ca. 400 dage i sedimentkerner fra lokaliteter i Odense (øverste) og Roskilde Fjord (nederst). Lokaliteter er samlet i grupper med silt (sort) silt-sand (blå) eller sand (rød). Bemærk at der er 2-3 lokaliteter i hver gruppe i hver fjord undtagen silt-sand i Roskilde Fjord hvor der kun er 1 lokalitet.

den samlede omsætning. Det gælder især på de sandede lokaliteter, der normalt har flere bunddyr end de siltede.

Kan man måle tabet af organisk stof?:

Vi vil jo gerne have svar på hvor lang tid der går før at det ophobede organiske stof i sedimentet forsvinder ved mikrobiel nedbrydning. En oplagt metode er at måle hastighe-

den hvormed organisk stof forsvinder i vores langtidforsøg. Det var dog ikke, selv efter et år, nogen målbar ændring i indholdet af organisk stof på de fleste lokaliteter (se Tabel 1 og 2). Det viser med al tydelighed hvor lille en andel af det samlede organiske indhold, der rent faktisk blev omsat i løbet af et år. Det er simpelt hen ikke muligt at opfange de små ændringer, der er tale om, med den præcision

teknikkerne til måling af organisk stof har.

Når vi nu ikke kan måle tabet i organisk stof direkte, må vi i stedet beregne os frem til det. Det kan gøres ved hjælp af kurveforløbet af iltoptagelsen over tid – under antagelse af, at hvert forbrugt iltmolekyle har givet anledning til nedbrydning af et organisk bundet kulstofatom. Forløbet af nedbrydning over tid (Fig. 3) stemmer fint overens med et eksponentielt henfald (Tabel 2). Når den eksponentielle model er tilpasset det observerede forløb, kan de afledte nedbrydningskonstanter benyttes til at beregne hvor meget organisk kulstof der faktisk blev nedbrudt i løbet af forsøget. Modellen bekræfter, at de forventede ændringer i sedimentets organiske indhold som følge af nedbrydning var ret små og dermed svære at måle.

Hvor lang tid tager det så at genskabe den gode fjordbund?

Den eksponentielle henfaldsmodel kan også give os et vigtigt og præcist mål for hvor lang tid, der vil gå før det organiske indhold i sedimenterne fra Odense og Roskilde Fjord vil falde til et økologisk acceptabelt niveau. Med et acceptabelt niveau menes en situation, hvor koncentrationer af giftige stofskefeprodukter som svovlbrinte (en medvirkende faktor i iltsvindshændelser) bliver lavere samtidigt med en sikker forankring af f.eks. ålegræs i bunden. Modellen kan, ud fra den stabile omsætningshastighed (RS) over lang tid, beregne hvornår tilstrækkelige mængder organisk stof er blevet nedbrudt til, at den oprindelige tilstand i fjordene er nået. Vore beregninger (Tabel 2) viser, at det overskydende organiske stof i sandede sedimentter vil mindskes betydelig i løbet af nogle få år til få årtier. I de mere finkornede, organisk rige sedimentter vil det dog tage op til flere årtier før det overskydende organiske stof mindskes betragteligt. Hvis de finkornede sedimentter skal nå et organisk indhold på under ca. 2%, som menes at være den øvre grænse for god forankring af ålegræs, vil det ifølge vore beregninger tage 30-50 år. Vi antager i disse beregninger, at den basale nedbrydningsrate (R_b) fortsætter uændret. Selv om vort forsøg er foregået over forholdsvis lang tid, kan vi ikke være sikre på hvordan nedbrydningen af de langsomt omsættelige organiske puljer forløber om nogle årtier. Selv med dette forbehold tyder vore resultater dog på, at der først kan forventes et væsentligt fald i sedimenternes organiske indhold efter nogle årtier. Og dette kan selvfølgelig kun ske, hvis tilførslen af nyt organisk stof mindskes markant ved at næsten – og helt urealistisk – at lukke for tilførsel af næringsstoffer.

Tabel 2. Nedbrydningsforløb angivet som koefficienter for en eksponentiel ligning af formen: $R = R_s + R_r - R_s e^{-kRt}$ fittet (men ikke vist) til iltoptagelseskurven (Fig. 2). Iltoptagelsesraten (R) er en funktion af tiden t (dage), R_r er den oprindelige (start) iltforbrugsrate, k_R er henfaldskoefficienten (et udtryk for hvor hurtigt iltforbruget "klinger af"), R_s er det stabile iltforbrug i slutfasen af forsøget. Den samlede omsætning af organisk stof i Odense og Roskilde Fjord er estimeret ud fra Figur 2. (* kun 1 silt-sand station i RF). "Slut organisk indhold" er det forventede organiske indhold som er tilbage efter forsøget baseret på den samlede organiske omsætning. Dette er sammenlignet med det målte organiske indhold ved forsøgets slutning. Endelig beregnes den tid det vil tage til at halvere det resterende organiske stof i de øverste 10 cm af sedimentet hvis omsætningshastigheder svarer til de basale rater, RS , estimeret ved hjælp af modellen.

		Nedbrydningsforløb				Slut organisk indhold (% OM)		Halveringstid for det resterende organiske stof
		RI	kR	RS	Samlet omsætning			
Fjord	Sediment type	mmol m ⁻² d ⁻¹	% d ⁻¹	mmol m ⁻² d ⁻¹	g C m ⁻²	Forventet	Målte	år
Odense	Silt	22,8	1,5	10,2	80-83	3,5-3,8	4,0-4,4	33-38
	Silt-sand	31,9	1,8	10,4	82-98	2,4-4,3	2,6-4,9	24-40
	Sand	35,7	3,9	10,7	72-92	0,1-3,5	0,3-3,9	3-31
Roskilde	Silt	42,6	0,8	13,7	78-107	16,8-19,27	13,0-23,2	17-25
	Silt-sand*	45,2	2,1	14,8	99	5,4	5,0-9,1	16
	Sand	49,3	2,2	14,9	71-72	0,2-0,5	0,2-0,8	2-3

Vil fjordenes sedimenter tillade at ålegræsset kommer tilbage?

Vort forsøg illustrerer hvordan sedimenter reagerer på lavere tilførsel af organisk stof, hvilket har relevans for ålegræssets fremtid i vore fjorde. På den ene side ændrer den mikrobielle aktivitet sig forbausende hurtigt på ændringer i tilførslen af organisk stof. Det betyder, at man, efter reduktion af nærings-tilførsel, hurtigt vil opnå en ny tilstand med lavere mikrobiel aktivitet, og dermed lavere udvikling af giftige stofs kofteprodukter/4/. Det betyder også at de "kemiske" betingelser i fjordens sedimenter bliver hurtigt højnet efter en forbedring af vandkvaliteten. På den anden side ser vi dog, at der vil gå årtier før blødbundsområder i vore fjorde kommer af med det overskydende organiske stof, så de bliver mere faste og dermed velegnede

for rodfæstet bundvegetation. Der skal dog tålmodighed til før resultaterne er synlige – en tålmodighed hverken EU's eller dansk miljølovgivning har. Vi skal dog fortsætte med at have fokus på vandkvalitet og dens effekter på havbunden, hvis vi ønsker forbedring af vore fjorde økosystemer - herunder et comeback for ålegræsset. Noget der nu nok ikke sker lige i den nærmeste fremtid uden assistance. Vi kunne for eksempel forsøge at konsolidere sedimenterne ved at klappe med sand for derefter at så eller plante ålegræs.

Referencer

- /1/ Meyer-Reil LA, Koster M. 2000: Eutrophication of marine waters: Effects on benthic microbial communities. *Mar Pollut Bull* 41(1-6):255-63.
 /2/ Wicks EC, Koch EW, O'Neil JM, Elliston K. 2009: Effects of sediment organic content and hydrodynamic

conditions on the growth and distribution of *Zostera marina*. *Marine Ecology-Progress Series* 378:71-80.

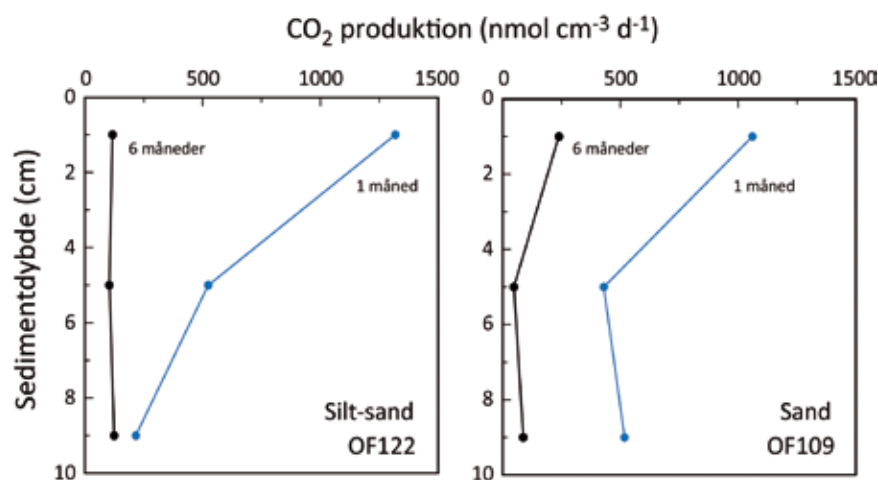
- /3/ Kristensen E. 2000: Organic matter diagenesis at the oxic/anoxic interface in coastal marine sediments, with emphasis on the role of burrowing animals. *Hydrobiologia* 426(1-3):1-24.
 /4/ Valdemarsen T, Kristensen E, Holmer M. 2009: Metabolic threshold and sulfide-buffering in diffusion controlled marine sediments impacted by continuous organic enrichment. *Biogeochemistry* 95(2-3):335-53.

GARY T. BANTA (banta@ruc.dk) er lektor på Institut for Miljø, Samfund og Rumlig Forandring (ENSPAC) på Roskilde Universitet (RUC).

ERIK KRISTENSEN (ebk@biology.sdu.dk), THOMAS VALDEMARSSEN (valdemarsen@biology.sdu.dk), CINTIA ORGANO QUINTANA KRISTENSEN (cintia@biology.sdu.dk) og MOGENS R. FLINT (mrf@biology.sdu.dk), er alle ansat på Biologisk Institut, Syddansk Universitet (SDU). Erik og Mogens er lektorer – Thomas og Cintia er post docs.

JENS BORUM (jborum@bio.ku.dk) er lektor og ANE LØVENDAHN RAUN (alraun@bio.ku.dk) er ph.d. studerende på Biologisk Institut, Ferskvandsafdeling, Københavns Universitet (KU).

ANNE ULDAHL (annu@env.dtu.dk) var ansat som videnskabelig assistent på Institut for Miljø, Samfund og Rumlig Forandring (ENSPAC) på Roskilde Universitet (RUC) under projektet. Anne er nu ph.d. studerende på DTU Miljø, Institut for Vand og Miljøteknologi, Danmarks Tekniske Universitet (DTU).



Figur 4. Dybdeprofiler af anaerob nedbrydning målt ved "jar" teknikken for to stationer i Odense Fjord. Nedbrydningen i hver dybde er bestemt fra hældningen af CO_2 udvikling over tid. Tre sedimentlag (0-2, 4-6 og 8-10 cm) er medtaget fra kerner 1 måned og 6 måneder efter forsøgets start.