

# NPo-forskning fra Miljøstyrelsen

Nr. C1 1990

## Denitrifikation og N-mineralisering i den kystnære havbund



**NPo-forskning fra Miljøstyrelsen  
Nr. C1 1990**

# **Denitrifikation og N-mineralisering i den kystnære havbund**

Jan Sørensen  
Mikael Hjorth Jensen

Århus Universitet  
Institut for Genetik og Økologi

Miljøministeriet  
Miljøstyrelsen

MILJØSTYRELSEN  
BIBLIOTEKET  
Strandgade 29 ✓  
1401 København K

	<u>Indhold</u>	
	<u>Sammendrag</u>	5
1.	<u>Indledning</u>	7
2.	<u>Materialer og metoder</u>	11
2.1	Prøvetagningslokaliteter i Århus Bugt	11
2.2	Undersøgte parametre og metodik	12
	2.2.1 Vandfase	12
	2.2.2 Sediment	12
3.	<u>Resultater</u>	14
3.1	Hydrografi	14
3.2	Koncentrationer af opløst $\text{NH}_4^+$ og $\text{NO}_3^-$	16
	3.2.1 Vandfase	16
	3.2.2 Overfladesediment	18
3.3	$\text{NH}_4^+$ og $\text{NO}_3^-$ flux	20
3.4	Denitrifikation	22
3.5	Partikulære $\text{NH}_4^+$ og $\text{NO}_3^-$ puljer i overfladesediment	23
4.	<u>Diskussion og konklusion</u>	26
4.1	Sedimentation af algeplanktonets for- årsmaximum	26
	4.1.1 Detritussedimentation og mi- krobiel aktivitet	26
	4.1.2 Sedimentation af levende alge- biomasse	27

4.2	Benthisk $\text{NH}_4^+$ og $\text{NO}_3^-$ flux: Regulerende faktorer	28
4.2.1	Vinter	28
4.2.2	Forår-Sommer	29
4.2.3	Efterår	32
4.3	Benthisk $\text{NH}_4^+$ og $\text{NO}_3^-$ flux i relation til denitrifikation	32
	<u>Referencer</u>	36

## SAMMENDRAG

Nærværende rapport viser, at en massiv sedimentation af algernes forårsmaximum kan medføre en drastisk forandring i sedimentets kvælstofkredsløb.

I Arhus Bugten kan sedimentationen øges kraftigt i forbindelse med den hastige algeopblomstring i det tidlige forår (marts-april) og således tilføre sedimentet en stor pulje af let nedbrydeligt algedetritus. Mineraliseringen af det nysedimenterede organiske materiale igangsættes omgående og samtidig med at sedimentets iltholdige overfladezone bliver meget snæver (1-2 mm), akkumuleres en pulje af opløst  $\text{NH}_4^+$  (ammonium) i det allerøverste sedimentlag, og  $\text{NH}_4^+$  afgivelsen til bundvandet stiger kraftigt i en kort periode med intens mineralisering.

I forbindelse med sedimentationen vil de endnu levende diatoméer indeholde store mængder intracellulære puljer af  $\text{NH}_4^+$  og  $\text{NO}_3^-$  (nitrat). De partikulære kvælstofpuljer er påvist for første gang i denne undersøgelse, men deres rolle under forårets og sommerens kvælstofudveksling ved sedimentoverfladen, f.eks. gennem en fortsat  $\text{NH}_4^+$  og  $\text{NO}_3^-$  assimilering hos de sedimenterede alger, er endnu uklar.

En indtrængen af  $\text{NO}_3^-$ -rigt (og iltfattigt) bundvand i forårsperioden blev vist at medføre, at  $\text{NO}_3^-$  optagelsen i sedimentet kan blive meget høj. Sedimentationen giver sig således udslag i et forårsmaximum i den bakterielle denitrifikation, men sidstnævntes størrelse kan afhænge af indtrængningen af  $\text{NO}_3^-$ -rigt bundvand.  $\text{NO}_3^-$  kilden til denitrifikationens maximum kan således hovedsageligt være

bundvandets  $\text{NO}_3^-$  pulje snarere end den bakterielle nitrifikation i sedimentet.

I efteråret og vinteren afgives  $\text{NH}_4^+$  og  $\text{NO}_3^-$  fra sedimentet med ca. samme hastighed og uden større variationer. En undtagelse er måske et mindre maximum i  $\text{NH}_4^+$  afgivelsen ved de høje temperaturer i sensommeren. Denitrifikationen er relativt lav gennem efteråret og vinteren, hvor processen er afhængig af nitrifikationen i sedimentet.

Årlige estimater viser, at der på den valgte lokalitet i Århus Bugten totalt afgives  $3.4 \text{ g N m}^{-2} \text{ år}^{-1}$  af uorganisk kvælstof på biologisk tilgængelig form ( $\text{NH}_4^+$  og  $\text{NO}_3^-$ ). Denitrifikationen repræsenterer afgivelsen af uorganisk kvælstof på biologisk utilgængelig form ( $\text{N}_2$ ) og udgør kun 25% af den totale årlige recirkulation af uorganisk kvælstof fra sedimentet til vandfasen. Det er for nylig vist, at frigivelsen af opløst organisk stof fra havbunden også kan spille en rolle for recirkulationen af kvælstof til vandmassernes algeproduktion.

Den mikrobielle stofomsætning efter forårs-sedimentationen påpeger havbundens vigtige rolle for mineraliseringen og recirkulationen af kvælstof til algeproduktionen i den relativt lavvandede Århus Bugt. De særlige hydrografiske forhold betinger, at denitrifikationen, dvs. fiernelsen af kvælstof fra algeproduktionen udløses af forårssedimentationen, men afhænger i størrelse af den pletvise akkumulering af detritus på havbunden og af den periodiske indtrængning af  $\text{NO}_3^-$  rigt bundvand fra det øvrige Kattegat. Under disse forhold må denitrifikationen således forventes at variere en del både regionalt og fra år til år.

## 1. INDLEDNING

**Primærproduktion** Kvælstof synes generelt at være den begrænsende faktor for algeplanktonets primærproduktion i havet (Ryther og Dunstan, 1971), således også i de indre danske farvande (Ærtebjerg et al., 1981). Mens den forøgede phytoplankton biomasse i Kattegat synes at være direkte knyttet til stigningen i næringsstofkoncentrationerne (kvælstofbelastningen), er det ikke fastslået hvorvidt primærproduktionen reelt er steget tilsvarende (Andersson og Rydberg, 1988).

**Sedimentation** En større eller mindre del af det assimilerede kvælstof vil med planktonalgernes sedimentation hvert år tilføres havbunden. Hvor stor en del og på hvilket tidspunkt er afhængig af de topografiske, hydrografiske og biologisk-oceanografiske forhold. Det er således karakteristisk at sedimentationen udviser en udpræget regional, sæsonmæssig og årlig variation. Den største sedimentation findes ofte i forbindelse med algernes produktionsmaxima i det tidlige forår og i efteråret, mens størstedelen af sommerens produktion omsættes i de frie vandmasser (Smetacek, 1980).

**Kvælstofkredsløb i havbunden** I marine sedimenter omsættes (mineraliseres) det organiske stof ved en række aerobe og anaerobe mikrobielle processer i en typisk lagdeling. Udstrækningen af det øverste iltholdige lag (den oxiske zone) er en væsentlig faktor i havbundens kvælstofkredsløb. Det høje iltforbrug i sedimentets overfladelag medfører at den oxiske zone oftest er meget smal; der er således på en række lokaliteter i Kattegat, Bælthavet og Skagerrak målt nedtrængningsdybder for  $O_2$  (ilt) i sedimentet på mellem 1.3 og

5.6 mm (B.B. Jørgensen og N.P. Revsbech, submitted). Ved den aerobe respiration ligesom ved forskellige anaerobe mineraliseringsprocesser frigives  $\text{NH}_4^+$  som slutprodukt. En del af den dannede  $\text{NH}_4^+$  afgives enten til vandmasserne ved diffusion eller oxideres til  $\text{NO}_3^-$  ved en bakteriel nitrifikation i sedimentets smalle, oxiske zone. Nitrifikationen kan danne et  $\text{NO}_3^-$  koncentrationsmaximum i det øverste sedimentlag, hvorfra  $\text{NO}_3^-$  ved en diffusion opad afgives til vandmasserne og en diffusion nedad reduceres til atmosfærisk kvælstof ( $\text{N}_2$ ) ved en bakteriel denitrifikation i den umiddelbart tilstødende, anoxiske zone. Udover nitrifikationen kan den ovenliggende vandfases  $\text{NO}_3^-$  indhold være en kilde til sedimentets denitrifikation. Det skal endelig tilføjes at bunddyrenes aktivitet, bioturbationen, generelt influerer på sedimentets kvælstofkredsløb (Aller, 1988; Kristensen, 1988).

Slutprodukter af kvælstof-mineraliseringen

Slutprodukterne af sedimentets kvælstof-mineralisering er biologisk tilgængeligt  $\text{NH}_4^+$  og  $\text{NO}_3^-$  (regenereret kvælstof), der afgives til vandmasserne og kan udnyttes af planktonalgerne, og biologisk utilgængeligt  $\text{N}_2$  der ultimativt ender i atmosfæren. Nyere undersøgelser viser dog, at opløst organisk kvælstof (specielt urea) kan have en væsentlig rolle i sedimenternes kvælstofkredsløb og også er en kvantitativ kvælstofkilde til vandmasserne (Lund, 1989).

Undersøgelsens formål og omfang

Hovedformålet med denne undersøgelse har været at belyse i hvilken grad regenereringen af kvælstofholdige næringssalte bestemmes af sedimentationsraten af organisk stof, af interaktionerne mellem de mikrobielle processer i kvælstofkredsløbet samt af den diffusive stof-



transport i overfladesedimentet. Undersøgelsen er foregået i Arhus Bugten, hvor der igennem 2 år blev foretaget hyppige målinger af proceshastigheder for denitrifikation og udveksling af uorganisk kvælstof. Desuden blev der målt koncentrationer af  $\text{NH}_4^+$  og  $\text{NO}_3^-$  i overfladesediment og bundvand samt en række hydrografiske parametre. Undersøgelsen har specielt fokuseret på effekterne af den massive sedimentation af algedetritus i foråret. Endelig er forekomsten og betydningen af intracellulære (partikulære) kvælstofpuljer i sedimenterede, levende alger undersøgt.

Kvælstofbelastning og iltsvind

Den stigende kvælstofbelastning af de indre danske farvande har ikke uventet medført nogle højst uheldige fænomener mht. havbundens stofskifte. Her tænkes specielt på den stigende frekvens og varighed af iltsvindsperioder, ikke bare i de kystnære områder (bugter, vige etc.) men også i de åbne havområder. Mens iltsvindsfænomenerne i de førstnævnte områder er en følge af den stigende eutrofiering, er det i en nyere undersøgelse foreslået, at spredningen af iltsvindet til åbne havområder kan være tilskyndet af en vind-induceret resuspension og partikel transport bort fra kystnære områder ('exporteret iltforbrug'), snarere end en direkte effekt af den øgede næringsstofbelastning (Fløderus, 1989). Nærværende undersøgelse relaterer sig ikke specielt til iltsvindsproblematikken, men rapportens resultater og konklusioner bør ses i lyset heraf.

Rapporten er et koncentrat af resultater som foreligger på artikelform. Der vil i teksten blive henvist til artiklerne med romertal I, II og III:

- I. Jensen, M .H., Lomstein, E., Sørensen, J.  
Benthic  $\text{NH}_4^+$  and  $\text{NO}_3^-$  flux following sedimentation of a spring phytoplankton bloom in Aarhus Bight, Denmark. Mar. Ecol. Prog. Ser. (submitted)
  
- II. Jensen, M.H., Andersen, T.K., Sørensen, J. (1988). Denitrification in coastal bay sediment: regional and seasonal variation in Aarhus Bight, Denmark. Mar. Ecol. Prog. Ser. 48: 155-162
  
- III. Lomstein, E., Jensen, M.H., Sørensen, J. Particulate  $\text{NH}_4^+$  and  $\text{NO}_3^-$  pools associated with phytoplankton sedimentation in a marine sediment (Aarhus Bight, Denmark). Mar. Ecol. Prog. Ser. (submitted)

## 2. MATERIALER OG METODER

### 2.1 Prøvetagningslokaliteter i Århus Bugt

Til undersøgelserne blev der udvalgt 3 lokaliteter, Stn 10, 16 og 22 (Fig. 1), på basis af en tidligere undersøgelse i Århus Bugten (Andersen & Sørensen, 1984). Lokaliteterne blev

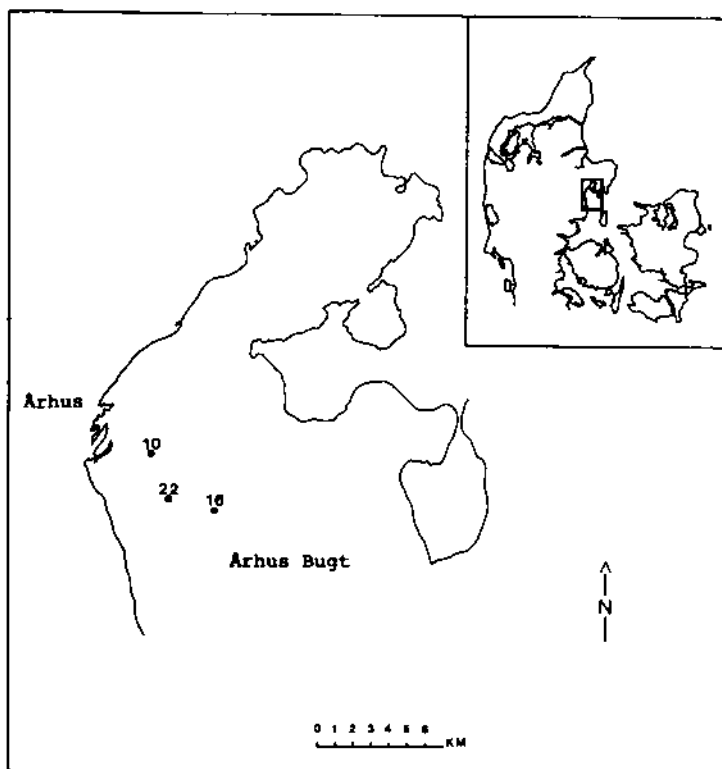


Fig. 1. Prøvetagningslokaliteter i Århus Bugt

udvalgt med henblik på at dække et spektrum af organisk stofindhold (II), samt med henblik på intensive undersøgelser af én lokalitet (Stn 16) karakteristisk for den midterste del af Århus Bugten (I; III). De undersøgte stationer har alle en vanddybde på 15 m. De nøjagtige positioner (Decca-koordinater) for Stn. 10, 16 og 22 er angivet i Andersen et al. (1986).

## 2.2. Undersøgte parametre og metodik

Undersøgelserne var primært af sæsonmæssig karakter, koncentreret omkring forårsperioden. Ved hver prøvetagning blev der foretaget bestemmelse af vandfaseparametre og et antal sedimentkerner blev taget til bestemmelse af sedimentkemiske parametre samt måling af proceshastigheder. Metoderne brugt i undersøgelsen er nøje beskrevet i I, II og III. I det følgende gives en kort oversigt over undersøgelsens omfang og metodikker.

### 2.2.1 Vandfase

Temperatur, salinitet og koncentrationerne af  $O_2$ ,  $NH_4^+$  og  $NO_3^-$  blev bestemt i overfladevand (2 m under overfladen) og bundvand (0.5 m over bunden) (I; II).

### 2.2.2 Sediment

Sedimentkarakteristik (II). Sedimentets vandindhold (vægt/vægt), densitet (vægt/vol) og indhold af organisk stof (glødetab) blev bestemt i intervaller ned til 4-5 cm dybde. Sedimentintervallernes porositet (vol/vol) blev bestemt ved multiplikation af vandindhold og densitet.

Sedimentpuljer af uorganisk kvælstof (I:III). Koncentrationsprofiler af  $NH_4^+$  og  $NO_3^-$  i overfladesedimentets porevand (opløste puljer) blev ved centrifugering bestemt i mm- til cm-intervaller ned til 4-5 cm dybde. Koncentrationsprofiler af partikelbundet  $NH_4^+$  og  $NO_3^-$  (partikulære puljer) blev i samme sedimentintervaller bestemt ved ekstraktion med KCl, flydende kvælstof ( $-196^{\circ}C$ ) og ethanol.

Måling af  $\text{NH}_4^+$   
og  $\text{NO}_3^-$  flux

Udveksling (flux) af uorganisk kvælstof over sedimentvand inter fasen (I). Et antal uforstyrrede sedimentkerner med overliggende, naturligt bundvand blev inkuberet i et passende tidsrum (0.5-4 timer) ved *in situ* temperatur under omrøring af vandfasen. Koncentrationerne af  $\text{NH}_4^+$  og  $\text{NO}_3^-$  i det ovenliggende vand blev målt i inkubationsperioden. Fluxen af  $\text{NH}_4^+$  og  $\text{NO}_3^-$  blev beregnet ud fra koncentrationsændringen med tiden og relateret til volumen af vandfasen og er således angivet per arealenhed af sedimentoverfladen ( $\text{mmol N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ). Efter inkubationen blev koncentrationsprofiler af opløst  $\text{NH}_4^+$  og  $\text{NO}_3^-$  bestemt i sedimentkernerne som beskrevet ovenfor.

$\text{C}_2\text{H}_2$ -inhiberingsteknik

Denitrifikation i sedimentet (II). Denitrifikationsmålingerne blev udført ved hjælp af en modificeret udgave af  $\text{C}_2\text{H}_2$ -inhiberingsteknikken (Sørensen, 1978; Andersen et al., 1984);  $\text{C}_2\text{H}_2$  blokerer det sidste trin i denitrifikationsprocessen, reduktionen af  $\text{N}_2\text{O}$  (lattergas) til  $\text{N}_2$ , hvorfor akkumuleringsraten af  $\text{N}_2\text{O}$  er et mål for denitrifikationsaktiviteten. Acetylen blev injiceret i vandfase og sediment i et antal af de ovenfor nævnte inkubationsrør. På forskellige tidspunkter i inkubationsperioden (op til 1.5 timer) blev  $\text{N}_2\text{O}$  koncentrationen i inkubationsrørene bestemt. Denitrifikationsaktiviteten er ligesom fluxhastighederne angivet i  $\text{mmol N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ .

### 3. RESULTATER

Indikatorer for forårets produktions- og sedimentationsperioder

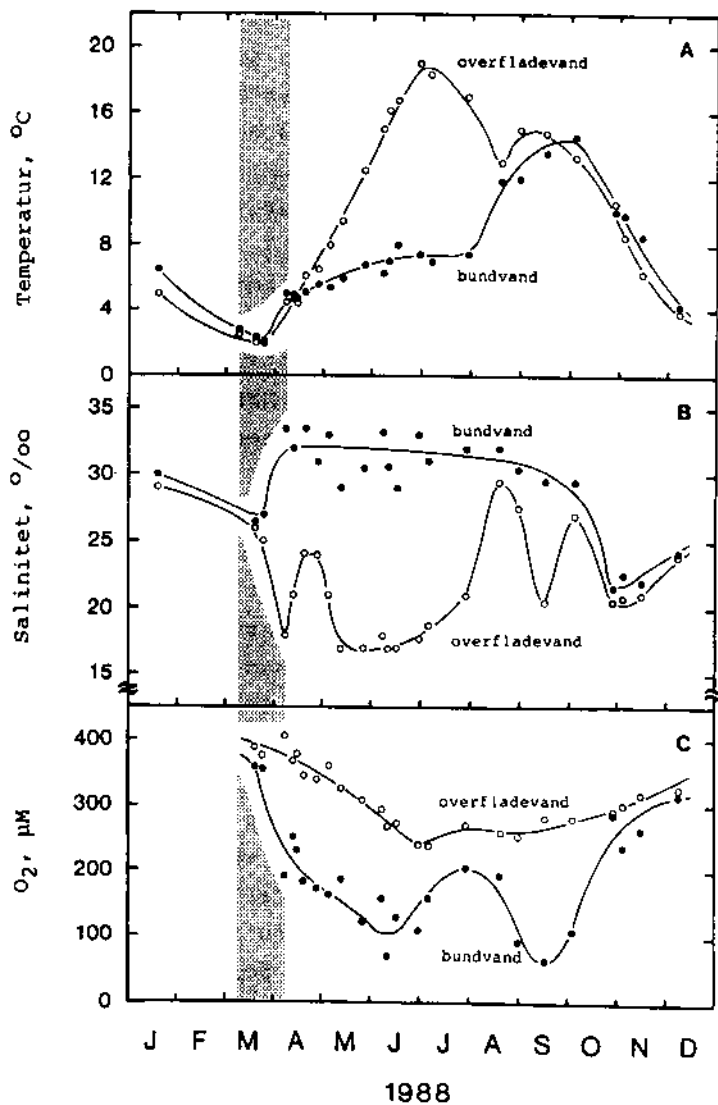
Da  $\text{NO}_3^-$  typisk er den væsentligste kvælstofkilde til algeplanktonets forårsmaximum, vil den faldende koncentration i overfladevandets  $\text{NO}_3^-$  pulje give en god indikation for produktionsperioden. Tidspunktet for massesedimentationen kan endvidere ofte lokaliseres ud fra en synlig ændring af overfladesedimentet. I Fig. 2-6 og 8 angiver den "skyggede" tidsperiode forårets produktionsmaximum og efterfølgende sedimentation.

#### 3.1 Hydrografi

Stratifikation af vandmasserne

De åbne vandmasser i Kattegat er kendetegnet af en overvejende stratifikation af vandmasserne, som primært skyldes store forskelle mellem overfladevandets og bundvandets salinitet; gennemsnitsdybden for denne haloklin er 15 m (Andersson og Rydberg, 1988). Vanddybden i undersøgelsesområdet (midterste del af Århusbugten) er ca. 15 m, og her vil stratifikationsperioderne således være afbrudt af perioder med opblanding. Karakteristisk er en sommerstratifikation (april-maj til juli-august) efterfulgt af en opblandingsperiode i efteråret (september-oktober til december); begge disse perioder kan aflæses i både temperatur- og salinitetsforløbet og er vist for 1988 på Fig. 2A & B. De hydrografiske forhold vinter og forår kan derimod svinge fra år til år. I 1988 fortsatte vandmasserne med at være opblandet i vinterperioden helt frem til april, og sommerstratifikationen dannedes samtidig med sedimentationen af algernes forårsmaximum (Fig. 2); de betydelige salinitetsændringer i

Sommerstratifikation



**Fig. 2.** Vandfase karakteristika, Arhus Bugt: Temperatur (A), salinitet (B) og O<sub>2</sub> koncentration i 1988. (o) overfladevand; (•) bundvand. Det skyggede område angiver produktions- og sedimentationsperioden for forårets algeopblomstring (se tekst).

både overflade- og bundvand samt den bratte temperaturstigning på kun 2 uger (ultimo marts-primo april) tydede på en indtrængning af 'nye' vandmasser i bugten (bundvandssaliniteten i Arhus Bugt primo april, 33.5 o/oo, indikerede en indtrængning af Kattegat-bundvand). Stratifikationen blev først helt opløst i oktober. I 1985 og 1986 sås derimod en vinterstratifikation som efter en kortvarig opblandingsperiode i april-maj blev afløst af en sommerstratifikation (II). Algernes forårsmaximum syntes således disse år at have sedimenteret inden den kortvarige opblandingsperiode.

O<sub>2</sub>-forhold i bundvandet

Frekvensen og varigheden af perioder med lave O<sub>2</sub> koncentrationer (eller deciderede iltvindperioder) synes at være stigende i Arhus Bugten og kan endog omfatte tilfælde i foråret (Fallesen, 1988). Et sådant billede tegnede sig i 1988 (Fig. 2C). Det tunge Kattegat-bundvand der trængte ind i bugten i det tidlige forår var iltfattigt; bundvandet var kun ca. 60% mættet med O<sub>2</sub> sammenfaldende med forårssedimentationen primo april, efter at have være fuldt iltmættet ultimo marts. Bundvandet var mere eller mindre iltfattigt i en lang periode derefter (svingende fra 22 til 77% mætning) og først efter opblandingen af vandmasserne i oktober reetableredes en fuldstændig iltmætning af bundvandet.

Iltfattigt bundvand april - oktober

### 3.2 Koncentrationer af opløst NH<sub>4</sub><sup>+</sup> og NO<sub>3</sub><sup>-</sup>

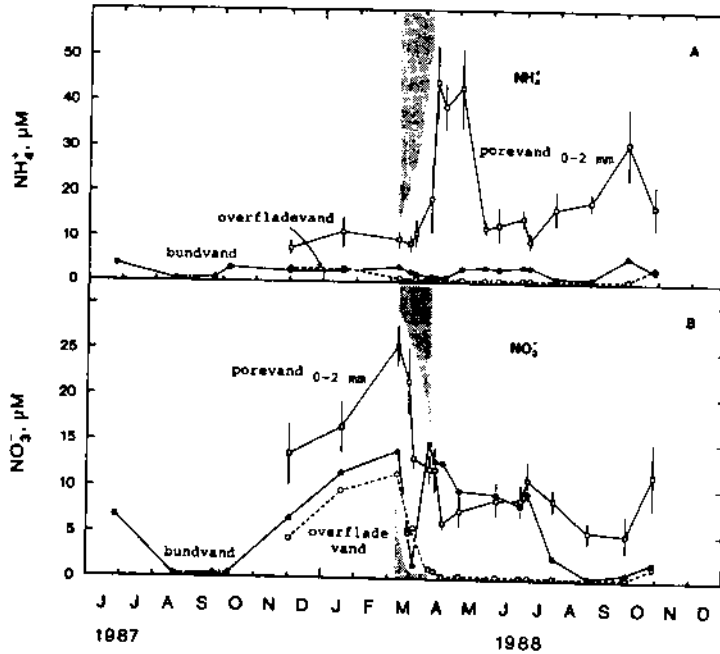
#### 3.2.1 Vandfase

Om vinteren er vandmassen rig på næringsstoffer exemplificeret ved den opblandede vandfase



Forårets alge-  
sedimentation  
synlig på sedi-  
mentoverfladen

i 1987-1988, hvor der målttes koncentrationer på ca.  $3 \mu\text{M NH}_4^+$  og  $10-15 \mu\text{M NO}_3^-$  (Fig. 3). Overfladevandets kvælstofpuljer blev dog hurtigt udtømt ( $<1 \mu\text{M}$ ) i forbindelse med algeplanktonets forårsproduktion (primo marts-primo april); algesedimentationen var tydeligvis foregået i slutningen af marts, da der i begyndelsen af april blev observeret et grønlig-brunt, flokkuløst (pletvist fordelt) lag (1-2 mm tykt) på sedimentoverfladen. En kortvarig forårsperiode med lave  $\text{NO}_3^-$  koncentrationer i bundvandet (marts 1988; Fig. 3) synes at være en årlig tilbagevendende begivenhed i



**Fig. 3.** Sæsonvariationer i  $\text{NH}_4^+$  (A) og  $\text{NO}_3^-$  (B) koncentrationen i vandfase og overfladesediment på Stn 16 i Århus Bugt. (o) overfladevand, (o) bundvand; (o) porevand (0-2 mm dybde). Skyggede område som i Fig. 2.

Næringsstofrigt  
bundvand efter  
forårssedimen-  
tationen

Århus Bugten; en sådan blev også observeret i maj 1985 og april 1986 (Andersen et al. 1986). Det høj-saline og iltfattige Kattegat-bundvand, der trængte ind i Århus Bugten samtidig med algesedimentationen i 1988, var næringsstofrigt og  $\text{NO}_3^-$  koncentrationen i bundvandet var derfor høj primo april (15  $\mu\text{M}$ ). Både bundvandskoncentrationerne af  $\text{NO}_3^-$  (8-10  $\mu\text{M}$ ) og  $\text{NH}_4^+$  koncentrationen (3-5  $\mu\text{M}$ ) forblev derefter relativt høje under den første del af sommerstratifikationen (april-juli), mens vandfasen var helt uden uorganisk kvælstof i august-september. Efter totalopblandingen i oktober sås den begyndende stigning mod de høje vinterkoncentrationer af  $\text{NO}_3^-$ . Den maksimale  $\text{NO}_3^-$  koncentration i vinterperioden har været konstant i perioden 1985-1988, ca. 15  $\mu\text{M}$  i februar-marts (Fig. 3; Andersen et al. 1986).

### 3.2.2 Overfladesediment

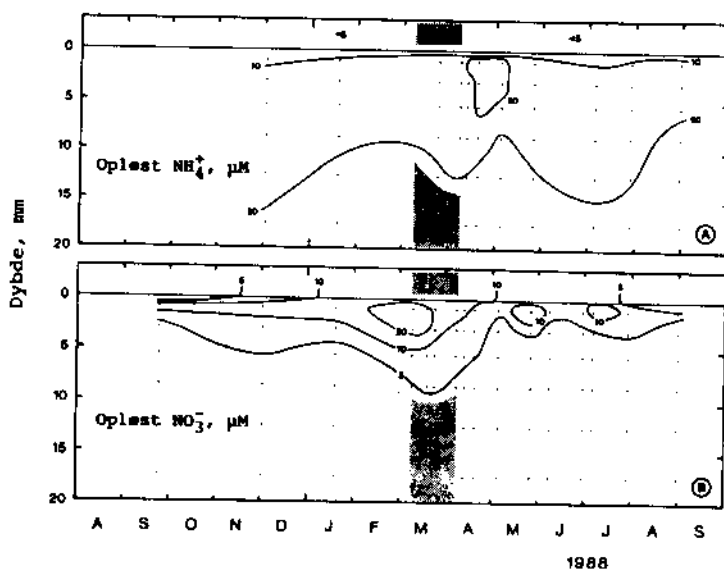
$\text{NH}_4^+$  akkumule-  
ring i overflade-  
sedimentet

Øverste 2 mm. Koncentrationerne af opløst  $\text{NH}_4^+$  og  $\text{NO}_3^-$  i sedimentets øverste 2 mm udviste en betydelig sæsonvariation på Stn 16 (Fig. 3 & 4).  $\text{NH}_4^+$  koncentrationen steg således betragteligt umiddelbart efter forårets algesedimentation (>40  $\mu\text{M}$  i april), efter at have været lav gennem vinteren (5-10  $\mu\text{M}$ ) (Fig. 3A). Dette sæsonmaximum var dog kortvarigt, og i løbet af maj observeredes et kraftigt fald. Resten af året lå koncentrationen på mellem 10 og 20  $\mu\text{M}$ , kun afbrudt af et sekundært efterårsmaximum i oktober (ca. 30  $\mu\text{M}$ ). Porevandets  $\text{NO}_3^-$  indhold i de øverste 2 mm var jævnt stigende gennem vinteren (Fig. 3B) og et maximum på ca. 25  $\mu\text{M}$  observeredes i marts. Efter forårssedimentationen sås et markant fald, og frem til oktober var koncentrationen relativt lav (5-10

Lav  $\text{NO}_3^-$  koncen-  
tration i over-  
fladesedimentet

$\mu\text{M}$ ); de laveste koncentrationer blev målt i april og september-oktober (ca.  $5 \mu\text{M}$ ).

**Profiler.** Den sæsonmæssige dybdefordeling af opløst  $\text{NH}_4^+$  og  $\text{NO}_3^-$  i sedimentets øverste 2 cm er vist på Fig. 4. Akkumuleringen af  $\text{NH}_4^+$  i overfladesedimentet efter forårssedimentationen omfattede de øverste 5-7 mm (Fig. 4A).



**Fig. 4.** Sæsonvariationer i porevandets indhold af  $\text{NH}_4^+$  (A) og  $\text{NO}_3^-$  (B) i Arhus Bugt sediment (stn 16) angivet som iso-koncentrationer. Skyggede område som i Fig. 2.

Dybere i sedimentet var koncentrationerne relativt konstante året rundt. Samtidig med  $\text{NO}_3^-$  akkumuleringen i overfladesedimentet i marts sås også et maximum i nedtrængningsdybden (Fig. 4B). Algesedimentationen forårsagede et fald både i koncentrationen og nedtrængningsdybden. Sidstnævnte var konstant lav gennem sommeren.

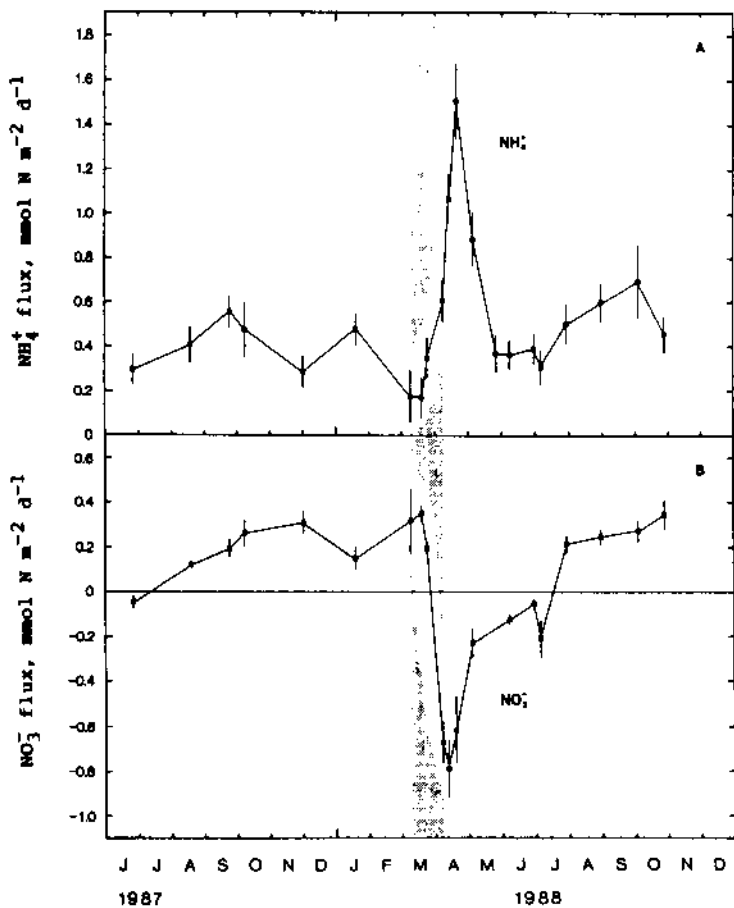
Negativ  $\text{NO}_3^-$   
koncentrations-  
gradient

Gradienter ved sedimentoverfladen. Koncentrationen af  $\text{NH}_4^+$  var altid højere i overfladesedimentet end i bundvandet (Fig. 3A) og koncentrationsgradienten indikerede således en  $\text{NH}_4^+$  afgivelse fra sedimentet til vandfasen året rundt. Koncentrationen af  $\text{NO}_3^-$  var derimod højere i bundvandet end i overfladesedimentets porevand (negativ koncentrationsgradient) i perioden mellem forårssedimentationen og den endelige udtømmning af bundvandets  $\text{NO}_3^-$  pulje (april-juli; Fig. 3B), hvilket indikerede en  $\text{NO}_3^-$  optagelse i denne periode. Resten af året forudsagde den positive gradient en  $\text{NO}_3^-$  afgivelse til vandfasen.

### 3.3 $\text{NH}_4^+$ og $\text{NO}_3^-$ flux

Høj  $\text{NH}_4^+$  af-  
givelse

På Stn 16 blev der målt  $\text{NH}_4^+$  afgivelse fra sedimentoverfladen til vandmasserne hele året, netop som forudsagt af koncentrationsgradienten ved sedimentoverfladen (Fig 4A). Den laveste  $\text{NH}_4^+$  flux blev målt sidst på vinteren ( $0.2 \text{ mmol N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  i marts; Fig. 5A), hvorefter fluxen steg dramatisk i en kort periode efter forårssedimentationen (max.  $1.5 \text{ mmol N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ). Den høje  $\text{NH}_4^+$  flux var i overensstemmelse med den kraftige  $\text{NH}_4^+$  akkumulering i overfladesedimentet på dette tidspunkt (Fig. 4A). Allerede i maj-juli var  $\text{NH}_4^+$  fluxen dog lav igen ( $0.35 \text{ mmol N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ). Et sekundært maximum blev observeret i efterårsperioden ( $0.6-0.7 \text{ mmol N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  og var sandsynligvis korreleret med et tilsvarende maximum i  $\text{NH}_4^+$  akkumuleringen i sedimentet på dette tidspunkt.



**Fig. 5.** Sæsonvariationer i  $\text{NH}_4^+$  (A) og  $\text{NO}_3^-$  (B) fluxen på Stn 16 i Århus Bugt. Negativ flux indikerer sedimentoptagelse. Skyggede område om i Fig. 2.

En moderat  $\text{NO}_3^-$  afgivelse ( $0.10-0.35 \text{ mmol N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) blev observeret fra sensommeren og frem til sidst på vinteren (august-marts) (Fig. 5B). Indtrængningen af  $\text{NO}_3^-$ -rigt bundvand og sedimentationen af algerne forårsagede et pludseligt skift til en høj  $\text{NO}_3^-$  optagelse ( $0.60 - 0.80 \text{ mmol N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  i april). Nitrat optagelsen fortsatte frem til august

Skift fra afgivelse til  $\text{NO}_3^-$  optagelse

( $0.15 \text{ mmol N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) så længe bundvandet var  $\text{NO}_3^-$ -rigt, og  $\text{NO}_3^-$  optagelsen var i hele perioden mellem april og juli korreleret med  $\text{NO}_3^-$  koncentrationen i bundvandet. Herefter skete igen et skift til  $\text{NO}_3^-$  afgivelse i forbindelse med udtømningen af bundvandets  $\text{NO}_3^-$  pulje i august. Ændringerne i  $\text{NO}_3^-$  fluxens retning kunne gennem hele året forudsiges af koncentrationsgradienten ved sedimentoverfladen (Fig. 4B).

### 3.4 Denitrifikation

Forårsmaximum i  
denitrifikation

På Stn 16 blev der i en tidligere undersøgelse i 1985-86 fundet den laveste denitrifikation i efterårs- og vinterperioden (Fig. 6); aktiviteten var her  $0.05$  til  $0.1 \text{ mmol N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . I forbindelse med algesedimentationen i det tidlige forår steg aktiviteten dramatisk (op til ca.  $0.70 \text{ mmol N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ); dette maximum efterfulgtes af en faldende aktivitet i forsommeren. Det samme sæsonmønster sås også på 2 andre stationer Stn 10 og 22, skønt disse generelt viste hhv. lavere og højere denitrifikation end Stn 16.

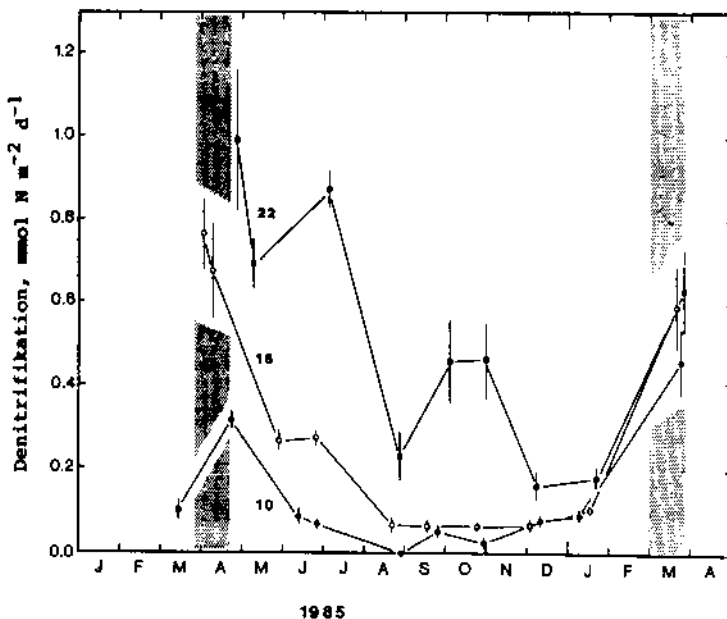


Fig. 6. Sæsonvariationer i sedimentets denitrifikation på Stn 10, 16 og 22 i Aarhus Bugt. Skyggede områder som i Fig. 2.

### 3.5 Partikulære $\text{NH}_4^+$ og $\text{NO}_3^-$ puljer i overfladesediment

Ved frysning af overfladesediment i flydende  $\text{N}_2$  kunne der ekstraheres betydelige mængder af  $\text{NH}_4^+$  og  $\text{NO}_3^-$  fra partikulære puljer, som i de allerøverste 2-4 mm langt oversteg de opløste  $\text{NH}_4^+$  og  $\text{NO}_3^-$  puljer i porevandet (Fig. 7).

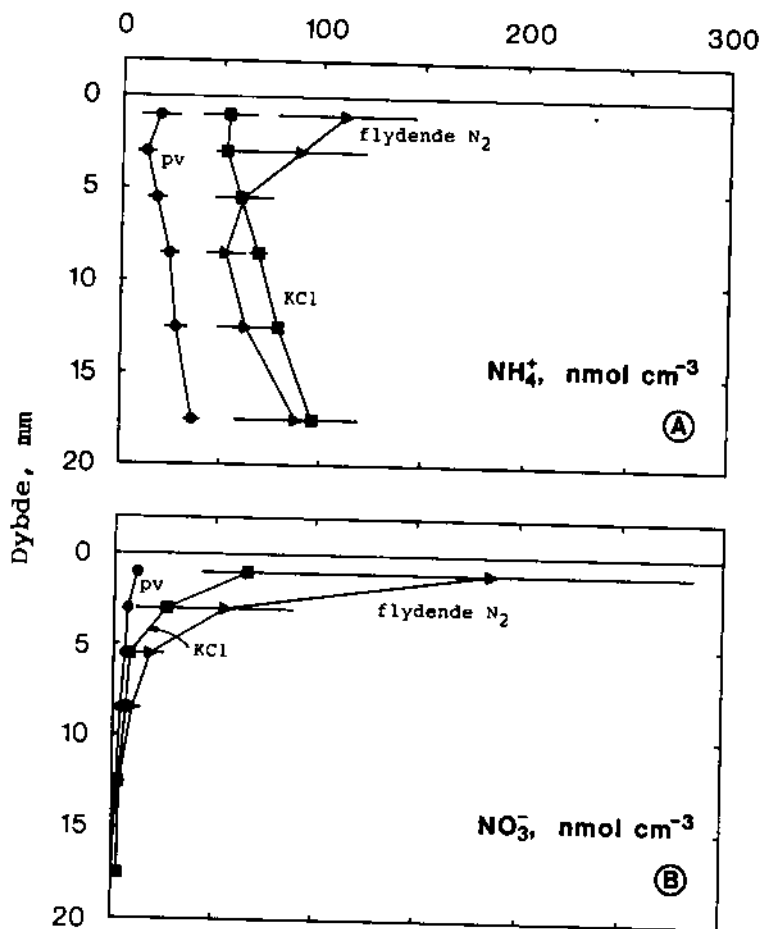


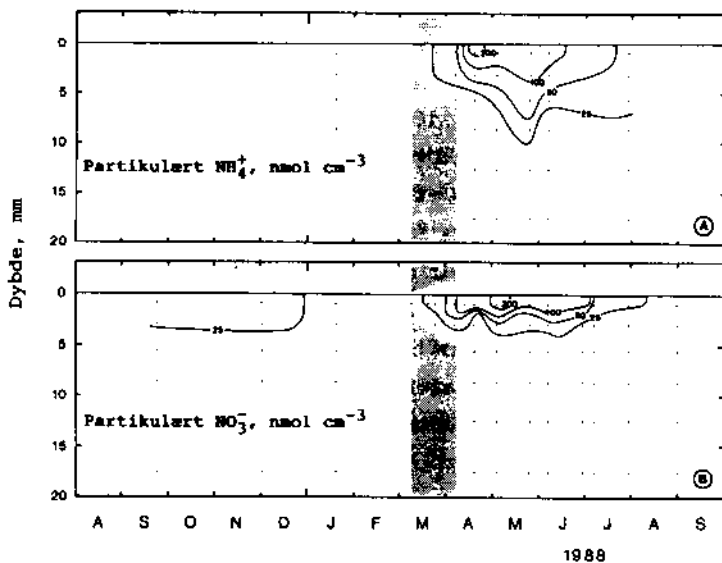
Fig. 7.  $\text{NH}_4^+$  (A) og  $\text{NO}_3^-$  (B) profiler i Århus Bugt sediment (Stn 16 - 7. april, 1988). Porevands koncentration (o) og puljer ekstraheret ved frysning i flydende  $\text{N}_2$  (>) og ved KCl-behandling (o).

Høje koncentrationer af partikulært  $\text{NH}_4^+$  og  $\text{NO}_3^-$

Koncentrationerne af de partikulære  $\text{NH}_4^+$  og  $\text{NO}_3^-$  puljer steg kraftigt i forbindelse med forårssedimentationen (Fig. 8) og kunne tilskrives intracellulære puljer i de nysedimenterede planktonalger, som i det tidlige forår især bestod af diatoméen *Skeletonema costatum*. Begge partikulære puljer var af betydelig størrelse gennem det meste af sommerperioden,



men forsvandt sidst på sommeren formentlig som et resultat af algernes nedbrydning.



**Fig. 8.** Sæsonvariationer i sedimentets indhold af partikulært NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (A) og NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (B) i Arhus Bugt (Stn 16) angivet som iso-koncentrationer. Skyggede område som i Fig. 2.

## 4. DISKUSSION OG KONKLUSION

### 4.1 Sedimentation af algeplanktonets forårs- maximum

Massiv alge-  
sedimentation  
i foråret

En stor del af årsproduktionen i Arhusbugten ( $100-200 \text{ g C m}^{-2} \text{ Ar}^{-1}$ ; G. Fallesen, pers. komm.) skyldes forårets produktionsmaximum. Dette udvikles typisk i februar-marts ( $>1 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ), mens vandmassernes næringsstofpulje er størst, og har en varighed på ca. en måned. Sedimentationen af denne algepopulation er ofte massiv og sammenfaldende med udtømmningen af næringsstofpuljerne; på grund af den ringe vanddybde (15 m) samt fraværet af græssende zooplankton i det tidlige forår (Vandkvalitetsinstituttet, 1980) vil størstedelen af primærproduktionen tilføres sedimentet som let-nedbrydeligt phytodetritus (I; II), hvoraf en del endnu vil være levende mikroalger (III).

#### 4.1.1 Detritussedimentation og mikrobiel aktivitet

Den pludselige tilførsel af en stor organisk stofpulje til sedimentet vil trods den relativt lave temperatur (Fig. 2) udløse en stærkt øget mikrobiel aktivitet i overfladesedimentet (se f.ex. Graf (1987) for en opsummering af resultater fra Kieler Bugten).

Fald i  $\text{O}_2$  ned-  
trængningsdybden  
efter forårs-  
sedimentationen

På Stn 16 gav sedimentationen sig bl.a. udslag i en betydelig reduktion af den oxiske zones dybde (I); fra at være ca. 5 mm ultimo marts var  $\text{O}_2$ -nedtrængningsdybden kun ca. 1.5 mm primo april (Rasmussen, 1989). Dette må hovedsageligt skyldes en stimulering af de  $\text{O}_2$  for-

brugende processer (mineraliseringen), men det samtidige fald i bundvandets  $O_2$  indhold (Fig. 2C) har dog også medvirket hertil.

Smal  $SO_4^{2-}$  reduktionszone i overfladesedimentet

Straks efter detritussedimentationen blev der observeret en smal zone med øget  $SO_4^{2-}$  reduktions aktivitet under det nysedimenterede lag (I). Zonen var tydeligvis adskilt fra den typisk dybereliggende  $SO_4^{2-}$  reduktions zone, der er kendt for havbunden. Den nye zone, der ikke tidligere er beskrevet, kunne bl.a. ses som en sortfarvning (udfældet jernsulfid,  $FeS$ ) umiddelbart under det flokkuløse overfladelag. Det brunlige algedetrituslag (med den smalle  $SO_4^{2-}$  reduktions zone under) var dog pletvist fordelt på havbunden (I; II). I foråret består overfladesedimentet således af organisk rige områder med et højt  $O_2$  forbrug og høj anaerob aktivitet samt relativt inaktive områder med et lavere  $O_2$  forbrug. Kun i de sidstnævnte synes der at være mulighed for en signifikant nitrifikationsaktivitet (Hammond et al., 1985). En tilsvarende 'patchiness' efter et nysedimenteret forårsmaximum er blevet observeret i Øresund (Christensen og Kannevorff, 1986).

Pletvis fordeling af det sedimenterede detritus

#### 4.1.2 Sedimentation af levende algebiomasse

Havbundens metabolisme i foråret kompliceres som nævnt af både indtrængningen af  $NO_3^-$ -rigt bundvand og den ujævne fordeling af det sedimenterede materiale, men er formodentlig også påvirket af stofskiftet hos de endnu levende, nysedimenterede alger i overfladesedimentet (III). En mikroskopisk undersøgelse af overfladesedimentet afslørede tydeligt, at der i det sedimenterede phytodetritus fandtes et stort antal levende kiselalger, primært af den

Levende kiselalger i det sedimenterede materiale

pelagiske Skeletonema costatum. Algens stofskifte er ukendt efter sedimentationen, men Noji et al. (1986) har beskrevet sedimentationen som en overgang ('transition phase') fra en pelagisk til en benthisk fase i diatomernes livscyklus.

Partikulært  
 $\text{NH}_4^+$  og  $\text{NO}_3^-$

De sedimenterede mikroalger blev påvist at indeholde store intracellulære puljer af uorganisk kvælstof, såkaldt partikulært  $\text{NH}_4^+$  og  $\text{NO}_3^-$  (Fig. 8) og eksistensen af disse puljer er ikke tidligere beskrevet. Foruden indholdet af organisk kvælstof, overførtes således med forårssedimentationen også en pulje af uorganisk kvælstof til sedimentet.

#### 4.2 Benthisk $\text{NH}_4^+$ og $\text{NO}_3^-$ flux: Regulerende faktorer

Externe faktorer  
der påvirker den  
benthiske  $\text{NH}_4^+$   
 $\text{NO}_3^-$  flux

Både  $\text{NH}_4^+$  og  $\text{NO}_3^-$  fluxen (Fig. 4) og koncentrationsgradienterne (Fig. 3) udviste en udpræget årstidsvariation, hvilket implicerer at balancen mellem de mikrobielle og fysiske processer, der bestemmer udvekslingen er følsom over for en række faktorer. De vigtigste eksterne faktorer synes her at være variationer i den organisk stoftilførsel (forårsalgenes sedimentation) og vandmassernes transport (indtrængning af  $\text{NO}_3^-$ -rigt bundvand). I det følgende beskrives de vigtigste kontrolfaktorer for  $\text{NH}_4^+$  og  $\text{NO}_3^-$  fluxen i udvalgte sæsonperioder.

##### 4.2.1 Vinter

Både  $\text{NH}_4^+$  fluxen og  $\text{NH}_4^+$  koncentrationen i overfladesedimentet var lave gennem vinteren (Fig. 3A & 4A). Vinterens sedimentpulje af organisk stof er da også typisk af refraktær ka-

rakter (Blackburn 1987) og iltforholdene i sedimentet gode ( $O_2$ -nedtrængningsdybden høj).

Høj nitrifikation i forhold til denitrifikation

Nitrifikationsaktiviteten i den relativt dybe oxiske zone synes at oxidere en stor del af den frigjorte  $NH_4$  ved mineraliseringen, idet  $NO_3^-$  og  $NH_4^+$  afgivelsen var af samme størrelsesorden (Fig. 4). Desuden akkumulerede  $NO_3^-$  i overfladesedimentet selv om bundvandets  $NO_3^-$  pulje kunne være høj (Fig. 3). Både nitrifikationen og bundvandets  $NO_3^-$  pulje var kilde til den lave denitrifikationsaktivitet om vinteren.

#### 4.2.2 Forår-Sommer

Abrupt skift i sedimentets metabolisme

De absolut mest dramatiske ændringer i havbundens stofskifte fandt sted i forbindelse med sedimentationen af algernes forårsmaximum, hvor også næringsrigt og iltfattigt bundvand trængte ind i bugten. I løbet af blot 2 uger skete der en fuldstændig ændring af sedimentets metabolisme.

Stærkt forøget mineralisering

Den markante  $NH_4^+$  akkumulering i de øverste sedimentlag og den op til 7.5 gange forøgede  $NH_4^+$  afgivelse efter forårssedimentationen må skyldes en stærkt forøget mineralisering foranlediget af den pludselige tilgængelighed af letomsætteligt organisk substrat. Af samme årsag var den  $O_2$ -holdige zone som tidligere nævnt meget smal i april (ca. 1.5 mm).  $NH_4^+$  akkumuleringen og den forøgede  $NH_4^+$  flux var dog kun et midlertidigt fænomen, og allerede i løbet af maj observeredes der vinterlignende forhold, formodentlig fordi den labile del af phytodetrituspuljen var udtømt. Lignende ændringer i  $NH_4^+$  fluxen og sedimentpuljen er observeret ved en experimental algeberigelse af

intakt overfladesediment (Garber, 1984; Kelly og Nixon, 1984; Enoksson, 1987), men er ikke tidligere vist in situ.

Ændret balance mellem nitrifikation og denitrifikation

Forårssedimentationen og den pludselige indtrængning af  $\text{NO}_3^-$ -rigt bundvand i Århus Bugten medførte at den beskedne  $\text{NO}_3^-$  afgivelse og  $\text{NO}_3^-$  akkumulering i overfladesedimentet i marts dramatisk blev afløst af en høj  $\text{NO}_3^-$  optagelse og et fald i  $\text{NO}_3^-$  koncentrationen i april (ned til ca.  $5 \mu\text{M}$ ). At der ved den samme  $\text{NO}_3^-$  koncentration (ca.  $15 \mu\text{M}$ ) i bundvandet primo marts og primo april blev målt en helt forskellig  $\text{NO}_3^-$  flux (henholdsvis  $0.30$  og  $-0.70 \text{ mmol N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) er en klar indikation for en ændret balance mellem  $\text{NO}_3^-$  produktion (nitrifikation) og  $\text{NO}_3^-$  forbrug (primært denitrifikation) i sedimentet. Der optræder da også et sæsonmaximum i denitrifikationen straks efter sedimentationen i foråret (Fig. 6).  $\text{NO}_3^-$  optagelsen klingede af i maj men fortsatte så længe  $\text{NO}_3^-$  koncentrationen i bundvandet var høj, og i hele perioden (april-maj) var disse to parametre korreleret. Dette betyder at sedimentets  $\text{NO}_3^-$  forbrugende processer var direkte afhængig af bundvandskoncentrationen af  $\text{NO}_3^-$  og nitrifikationen således ikke var i stand til at dække  $\text{NO}_3^-$  forbruget i sedimentet i denne periode.

Reduceret nitrifikationsaktivitet

En reduceret nitrifikationsaktivitet i perioden efter forårssedimentationen kunne også sandsynliggøres ved andre observationer. Det pludselige skift til en  $\text{NO}_3^-$  optagelse i forbindelse med den lave  $\text{NO}_3^-$  koncentration i overfladesedimentet og den stærkt forøgede  $\text{NH}_4^+$  afgivelse i forbindelse med den høje  $\text{NH}_4^+$  koncentration i overfladesedimentet er begge indikationer herpå. Selv om den øgede tilgæn-

Nitrifikationen hæmmet af den lave  $O_2$ -nedtrængning

gelighed af  $NH_4^+$  skulle stimulere nitrifikationsaktiviteten på volumenbasis i det oxiske lag (Henriksen og Kemp, 1988), blev den totale nitrifikation (per arealenhed) sandsynligvis begrænset af den lave  $O_2$  nedtrængning efter sedimentationen. Hansen et al. (1981) noterede også nedtrængningen af den  $O_2$ -holdige zone som en af de væsentligste kontrolfaktorer for sedimentets nitrifikation.

Den oxiske zone er en diffusionsbarriere for  $NO_3^-$  transport

Bundvandet var hermed den langt væsentligste  $NO_3^-$  kilde for denitrifikationen i foråret. Foruden at hæmme nitrifikationen kan reduktionen af  $O_2$  nedtrængningsdybden (det øgede  $O_2$  forbrug) indirekte have medvirket til denitrifikationens forårsmaximum. Generelt virker den oxiske zone nemlig som en diffusionsbarriere for  $NO_3^-$  transport mellem vandfasen og den dybereliggende denitrifikationszone og dens tykkelse er ofte en betydelig kontrolfaktor for processen (Christensen et al., 1989; Nielsen et al., submitted).

Mulig  $NH_4^+$  og  $NO_3^-$  optagelse af levende alger

Endelig skal det nævnes at de levende, nysedimenterede alger kan have medvirket til  $NO_3^-$  optagelsen i foråret og perioden derefter. De partikulære  $NH_4^+$  og  $NO_3^-$  puljer, oprindeligt tilført sedimentet i foråret, opretholdtes gennem sommeren og en assimilering ved  $NO_3^-$  (og  $NH_4^+$ ) optagelse fra bundvand og porevand kan derfor ikke udelukkes. Lysforholdene ved sedimentoverfladen i Århus Bugten blev ikke målt, men resultater fra andre Kattegat sedimenter på tilsvarende dybder tyder på at der er tilstrækkelig lys til en fotosyntetisk aktivitet, og at  $O_2$  produktion og assimilering af næringsstoffer influerer på den benthiske kvælstofflux (Sundbäck og Granéli, 1988; Sundbäck og Jönsson, 1988; B.B. Jørgensen og N.P.

Revsbech, submitted). Selv om udvekslingsforsøgene i Århus Bugt blev udført i mørke kan en eventuel assimilering af  $\text{NH}_4^+$  og  $\text{NO}_3^-$  have fortsat (Andersen og Kristensen, 1988).

#### 4.2.3 Efterår

Nitrifikation  
eneste  $\text{NO}_3^-$   
kilde til deni-  
trifikation

$\text{NO}_3^-$  fluxen blev igen positiv sidst på sommeren på grund af udtømningen af bundvandets  $\text{NO}_3^-$  pulje og sedimentets nitrifikation. Nitrifikationen afgav  $\text{NO}_3^-$  til vandfasen og var eneste  $\text{NO}_3^-$  kilde til den iverdigt relativt lave denitrifikation. Generelt var både  $\text{NH}_4^+$  og  $\text{NO}_3^-$  fluxen konstant i denne periode måske undtaget et sekundært  $\text{NH}_4^+$  flux maximum i september-oktober. De relativt høje temperaturer på dette tidspunkt (12-15°C) og den stadig lave  $\text{O}_2$  tension i bundvandet kunne i mindre grad have øget mineraliseringen relativt til nitrifikationen og en vis  $\text{NH}_4^+$  akkumulering (og lavt  $\text{NO}_3^-$  indhold) i overfladesedimentet blev da også observeret.

#### 4.3 Benthisk $\text{NH}_4^+$ og $\text{NO}_3^-$ flux i relation til denitrifikation

De detaljerede målinger af kvælstoffluxene og denitrifikationen gør det muligt at kvantificere den sæsonmæssige og årlige regenerering af uorganiske næringssalte i Århus Bugten (Stn 16) samt denitrifikationens rolle (Tabel 1). Opdelingen i perioderne april-medio juli og medio juli-marts valgtes på basis af sedimentets  $\text{NO}_3^-$  optagelse henholdsvis  $\text{NO}_3^-$  afgivelse.

Årlig afgivelse  
af uorg. kvæ-  
stofnæringssalte

Nettoafgivelsen af  $\text{NH}_4^+$  og  $\text{NO}_3^-$  beløb sig  
Årligt til 210 mmol N  $\text{m}^{-2}$  eller 3.0 g N  $\text{m}^{-2}$ .  
Hvis  $\text{NO}_3^-$  optagelsen i forårsperioden ikke in-



kluderes i beregningen, blev der i 1987-1988 totalt afgivet  $243 \text{ mmol N m}^{-2} \text{ år}^{-1}$  eller  $3.4 \text{ g N m}^{-2} \text{ år}^{-1}$ . Langt den største del af afgivelsen var i form af  $\text{NH}_4^+$  ( $181 \text{ mmol N m}^{-2} \text{ år}^{-1}$  eller  $2.5 \text{ g N m}^{-2} \text{ år}^{-1}$ ). Dagligt blev der i gennemsnit afgivet mere  $\text{NH}_4^+$  i perioden efter forårssedimentationen end resten af året.

Denitrifikationens andel af den totale, årlige afgivelse

Denitrifikationen ( $70 \text{ mmol N m}^{-2} \text{ år}^{-1}$  eller  $1.0 \text{ g N m}^{-2} \text{ år}^{-1}$ ) udgjorde ca. 25 % af den årlige nettoafgivelse af uorganisk kvælstof ( $280 \text{ mmol N m}^{-2} \text{ år}^{-1}$  eller  $3.9 \text{ g N m}^{-2} \text{ år}^{-1}$ ); dette er tæt på et tidligere estimat, 22%, for det vestlige Kattegat (Blackburn og Henriksen, 1983). Andelen var dog højere, 55%, i perioden efter sedimentationen på grund af den betragtelige  $\text{NO}_3^-$  optagelse, mens den kun var 15% resten af året hvor den daglige denitrifikationsaktivitet var en faktor 3 lavere.

Estimater af  $\text{NO}_3^-$  kilde til denitrifikation

Beregningerne tillader også en kvantitativ vurdering af nitrifikationen versus bundvands  $\text{NO}_3^-$  pulje som kilde til denitrifikationen (Tabel 1). I forårsperioden (april-medio juli) havde denitrifikationen næsten samme størrelse som  $\text{NO}_3^-$  optagelsen, som igen var direkte korreleret med bundvandskoncentration af  $\text{NO}_3^-$ . Bundvandet leverede derfor 85% af det  $\text{NO}_3^-$  der blev reduceret ved denitrifikationen i denne periode. Resten af året, hvor  $\text{NO}_3^-$  blev afgivet fra sedimentet, kunne al  $\text{NO}_3^-$  potentielt leveres af nitrifikationen. I marts-november var  $\text{NO}_3^-$  koncentrationen i bundvandet imidlertid høj (Fig. 3B), og både bundvandet og nitrifikationen har bidraget med  $\text{NO}_3^-$  til denitrifikationen; 0%-estimatet i Tabel 1 for denne periode er derfor en undervurdering. Af samme grund må det årlige 47%-estimat ligeledes være en undervurdering.

Tabel 1.  $\text{NH}_4^+$  og  $\text{NO}_3^-$  fluxen, denitrifikationsaktiviteten ( $\text{N}_2$  plus  $\text{N}_2\text{O}$  flux) og den totale uorganiske kvælstofflux uorg. N) i Århus Bugt (Stn 16). Også vist er denitrifikationens procentvise andel af den totale uorganiske kvælstofflux samt den procentvise andel af denitrifikationsaktiviteten som skyldes  $\text{NO}_3^-$  diffusion fra bundvandet. Negativ flux indikerer sedimentoptagelse.

Periode	Flux <sup>a</sup>				% af uorg. N flux som skyldes denitrifikation	% af denitrifikation som skyldes $\text{NO}_3^-$ diffusion fra bundvand
	$\text{NH}_4^+$	$\text{NO}_3^-$	Denitrif.	uorg. N		
April - medio juli	66 (0.62)	-33 (-0.32)	39 (0.36)	72 (0.67)	55	85 <sup>b</sup>
medio juli - marts	175 (0.45)	62 (0.24)	31 (0.12)	208 (0.81)	15	> 0 <sup>c</sup>
Årlig	181 (0.50)	29 (0.08)	70 (0.19)	280 (0.77)	25	> 47 <sup>d</sup>

<sup>a</sup> Enhed i  $\text{mmol N m}^{-2}$  for angivne periode; værdier i parentes er daglige gennemsnit i  $\text{mmol N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$

<sup>b</sup>  $\text{NO}_3^-$  optagelse/denitrifikation i april - medio juli x 100

<sup>c</sup> Minimum estimeret (se tekst)

<sup>d</sup>  $\text{NO}_3^-$  optagelse i april - medio juli/årlig denitrifikation x 100. (minimum estimeret; se tekst)

Mindst 50% af den årlige denitrifikation er baseret på bundvandets  $\text{NO}_3^-$  pulje

Det kan herefter konkluderes, at halvdelen eller mere af den årlige denitrifikation skyldtes  $\text{NO}_3^-$  diffusion fra bundvandet. Dette er umiddelbart i modstrid med forslaget om, at nitrifikationen generelt er langt den største  $\text{NO}_3^-$ -kilde til denitrifikationen i kystnære, marine sedimenter med veliltet bundvand (Seitzinger, 1988). Sidstnævnte var baseret på data fra adskillige studier, som enten viste konstant  $\text{NO}_3^-$  afgivelse fra sedimentet eller en  $\text{NO}_3^-$  optagelse der var langt mindre end denitrifikationsraten. Forskellige forhold såsom den massive forårssedimentation og den stratificerede vandmasse med lejlighedsvis indtrængning af  $\text{NO}_3^-$ -rigt, relativt iltfattigt bundvand i Århus Bugten, vil medføre, at Århus Bugten og måske større dele af Kattegat afviger fra det generelle mønster, der blev foreslået af Seitzinger (1988). De samme

Regional og År-  
lig variation  
i denitrifika-  
tionen

forhold betinger iøvrigt, at denitrifikationen i Århus Bugten vil vise betydelig regional variation (pletvis akkumulering af detritus) og årlig variation (periodevis indtrængning af  $\text{NO}_3^-$ -rigt bundvand). Selv om de observerede forhold må forventes at findes i andre dele af Kattegat og således har kvalitativ gyldighed, kan det ikke anbefales at give de ovennævnte proceshastigheder, osv. kvantitativ og generel gyldighed for større dele af vore kystnære havområder.

## REFERENCER

Aller, R.C. (1988): Benthic fauna and biogeochemical processes in marine sediments: the role of burrow structures. In: Blackburn, T.H. og J. Sørensen (eds.) Nitrogen cycling in coastal marine environments. John Wiley & Sons, Chichester, p. 301-338

Andersen, F.Ø. og E. Kristensen (1988): The influence of macrofauna on estuarine benthic community metabolism: a microcosm study. *Marine Biology* 99, 591-603

Andersen, T.K. og J. Sørensen (1984): Denitrifikation og sedimentkarakteristik i Århus Bugt. Præliminære undersøgelser, sept.-nov., 1984. Rapport til Miljøstyrelsen. Inst. f. Genetik & Økologi, Århus Universitet.

-, M.H. Jensen og J. Sørensen (1984): Diurnal variation of nitrogen cycling in coastal, marine sediments. I. Denitrification. *Marine Biology* 83, 171-176

-, - og - (1986): Denitrifikation i havbunden. Processens Årstidsvariation i Århus Bugten. Rapport til Miljøstyrelsen og SNF. Inst. f. Genetik & Økologi, Århus Universitet.

Andersson, L. og L. Rydberg (1988): Trends in nutrient and oxygen conditions within the Kattegat: Effects of local nutrient supply. *Estuarine Coastal & Shelf Science* 26, 559-579

Blackburn, T.H. (1987): Microbial food webs in sediments. In: Sleigh, M.A. (ed.) *Microbes in the sea*. Ellis Horwood, Chichester, p. 39-58

- Blackburn, T.H. og K. Henriksen (1983): Nitrogen cycling in different types of sediment from Danish waters. *Limnology & Oceanography* 28, 477-493
- Christensen, H. og E. Kannevorff (1986): Sedimentation of phytoplankton during a spring bloom in the Øresund. *Ophelia* 26, 109- 122
- Christensen, P.B., L.P. Nielsen, N.P. Revsbech og J. Sørensen (1989): Microzonation of denitrification activity in stream sediments as studied with a combined oxygen and nitrous oxide microsensor. *Applied and Environmental Microbiology* 55, 1234-1241
- Enoksson, V. (1987): Nitrogen flux between sediment and water and its regulatory factors in coastal areas. Ph.D. Rapport. Afd. f. Marin Mikrobiologi, Gøteborg Universitet
- Fallesen, G. (1988): Notat om iltsvind, fiske-død og masseforekomst af alger i Århus Amts marine områder. Teknisk rapport. Miljøkontoret, Århus Amtskommune.
- Fløderus, S. (1989): The effect of sediment resuspension on nitrogen cycling in the Kattégat - variability in organic matter transport. Ph.D. Rapport (UNGI Rapport nr. 71). Inst. f. Fysisk Geografi, Uppsala Universitet.
- Garber, J.H. (1984):  $^{15}\text{N}$  study of the short-term fate of particulate organic nitrogen at the surface of coastal marine sediments. *Marine Ecology Progress Series* 16, 89-104

- Graf, G. (1987): Benthic response to the annual sedimentation patterns. In: Rumohr, J., E. Walger og B. Zeitzschel (eds.) Lecture notes on coastal and estuarine studies, vol. 13. Seawater-sediment interactions in coastal waters. An inter disciplinary approach. Springer-Verlag, New York, p. 84-92
- Hammond, D.E., C. Fuller, D. Harmon, B. Hartman, M. Korosec, L.G. Miller, R. Rea, S. Warren, W. Berelson og S.W. Hager (1985): Benthic fluxes in San Fransisco Bay. *Hydrobiologia* 129, 69-90
- Hansen, J.I., K. Henriksen og T.H. Blackburn (1981): Seasonal distribution of nitrifying bacteria and rates of nitrification in coastal marine sediments. *Microbial Ecology* 7, 297-30
- Henriksen, K. og W.M. Kemp (1988): Nitrification in estuarine and coastal marine sediments. In: Blackburn, T.H. og J. Sørensen (eds.) Nitrogen cycling in coastal marine environments. John Wiley & Sons, Chichester, p. 207-249
- Jørgensen, B.B. og N.P. Revsbech: Oxygen uptake, bacterial distribution, and carbon-nitrogen-sulfur cycling in sediments from the Baltic Sea - North Sea transition. Submitted, *Ophelia*.
- Kelly, J.R. og S.W. Nixon (1984): Experimental studies of the effect of organic deposition on the metabolism of a coastal marine bottom community. *Marine Ecology Progress Series* 17, 157- 169

- Kristensen, E. (1988): Benthic fauna and biogeochemical processes in marine sediments: microbial activities and fluxes. In: Blackburn, T.H. og J. Sørensen (eds.) Nitrogen cycling in coastal marine environments. John Wiley & Sons, Chichester, p. 275-299
- Lund, B.Aa. (1989): Kvælstofomsætning i marine miljøer. Lic. Afhandl. Inst. f. Genetik & Økologi, Århus Universitet.
- Nielsen, L.P., P.B. Christensen, N.P. Revsbech og J. Sørensen: Denitrification and photosynthesis in stream sediments studied with microsensor and whole core techniques. Submitted, Limnology & Oceanography
- Noji, T., U. Passow og V. Smetacek (1986): Interactions between pelagial and benthic during autumn in Kiel Bight. I. Development and sedimentation of phytoplankton blooms. *Ophelia* 26, 333-349
- Rasmussen, H. (1989): Sedimentets iltoptagelse med særligt henblik på årstidsvariationen i Århus Bugt. Spec. Rapp. Inst. f. Genetik og Økologi, Aarhus Universitet
- Ryther, J.K. og W.M. Dunstan (1971): Nitrogen, phosphorus and eutrophication in the coastal marine environment. *Science* 171, 1008-1013
- Seitzinger, S.P. (1988): Denitrification in freshwater and coastal marine ecosystems: Ecological and geochemical significance. In: Nixon, S.W. (ed.) Comparative ecology of freshwater and coastal marine systems. *Limnology & Oceanography* 33, spec. publ. no. 4, 702-725

Sundbæk, K. og W. Granéli (1988): Influence of microphytobenthos on the nutrient flux between sediment and water: a laboratory study. *Marine Ecology Progress Series* 43, 63-69

- og B. Jønsson (1988): Microphytobenthic productivity and biomass in sublittoral sediments of a stratified bay, southeastern Kattegat. *Journal of Experimental Marine Biology & Ecology* 122, 63-81

Sørensen, J. (1978): Denitrification rates in a marine sediment as measured by the acetylene inhibition technique. *Applied & Environmental Microbiology* 36, 139-143

Vandkvalitetsinstituttet, ATV (1980): Århus Bugt-Kalø Vig, 1978-1979. Delrapport nr. 5: Zooplankton. Rapport til Århus Amtskommune og Århus Kommune.

Ertebjerg, G., T. Jacobsen, E. Gargas og E. Buch (1981): The Belt project. Evaluation of the physical, chemical and biological measurements. Miljøstyrelsen, København









# Registreringsblad

**Udgiver:** Miljøstyrelsen, Strandgade 29, 1401 København K.

**Serietitel, nr.:** NPo-forskning fra Miljøstyrelsen, C1

**Udgivelsesår:** 1990

**Titel:**

Denitrifikation og N-mineralisering i den kystnære havbund

**Undertitel:**

**Forfatter(e):**

Sørensen, Jan; Jensen, Mikael Hjorth

**Udførende institution(er):**

Århus Universitet. Institut for Genetik og Økologi

**Resumé:**

En sæsonmæssig undersøgelse af sedimentets kvælstofomsætning i Århus Bugt viser en massiv sedimentation af phytoplanktonets produktionsmaximum i det tidlige forår og en samtidig indtrængen af nitratrigt Kattegatbundvand. Dette udløser store ændringer i havbundens N-kredsløb: Maxima i havbundens bakterielle denitrifikation, frigivelse af ammonium til vandmasserne, et skift fra lav nitratagivelse til høj sedimentoptagelse og tilførsel af partikulære, intracellulære puljer af uorganisk kvælstof til havbunden.

**Emneord:**

denitrifikation; prøvetagning; omsætning; nedbrydning; tidsvariationer; sedimenter; plankton; kystvande; nitrogen CAS 7727-37-9

**ISBN:** 87-503-8252-7

**ISSN:**

**Pris:** 85,- (inkl. 22 % moms)

**Format:** A5

**Sideantal:** 44 s.

**Md./år for redaktionens afslutning:** december 1989

**Oplag:** 400

**Andre oplysninger:**

Rapport fra koordinationsgruppe C for vandløb, søer og marine områder

**Tryk:** Luna-Tryk ApS, København

# Denitrifikation og N-mineralisering : den kystnære havbund

100  
Miljøforskning nr. 61 1990

En sæsonmæssig undersøgelse af sedimentets kvælstofomsætning i Århus Bugt viser en massiv sedimentation af phytoplanktonets produktionsmaximum i det tidlige forår og en samtidig indtrængen af nitratrigt Kattegat-bundvand. Det udløser store ændringer i havbundens N-kredsløb:

Maxima i havbundens bakterielle denitrifikation, frigivelse af ammonium til vandmasserne, et skift fra lav nitrat afgivelse til høj sedimentoptagelse og tilførsel af partikulære, intracellulære puljer af uorganisk kvælstof til havbunden.



Miljøministeriet **Miljøstyrelsen**

Strandgade 29, 1401 København K, tlf. 31 57 83 10

**Pris kr. 85.- inkl. 22% moms**

ISBN nr. 87-503-8252-7

Miljøstyrelsen