

Det er næringsstofferne, der giver grundlaget for, at et iltsvind kan opstå. Men det er vejrforhold og havstrømme, der betinger, at det sker. Jo flere næringsstoffer der er i de kystnære farvande, jo større er risikoen for et omfattende iltsvind, hvis de fysiske forhold sætter det i gang. Forbliver vejret og havstrømmene, som vi kender dem i dag, viser modelberegninger, at der vil komme færre planktonalger og færre dage med iltsvind, hvis vi tilfører mindre kvælstof til de indre danske farvande.

Våde vintre med meget nedbør giver meget kvælstof til havet, da kvælstof vaskes ud fra markerne og transporteres ud i havet. Vi får altså meget forskellige mængder kvælstof til havet fra år til år. Da vejrforholdene (vind og varme) endvidere varierer fra sommer til sommer, varierer forekomst og udbredelse af iltsvind i de danske farvande også meget fra år til år.

I de lavvandede fjorde og kystnære områder kan der være store udsving i iltindholdet på døgnbasis. Om dagen kan man finde overmætning af ilt i vandsøjlen pga. planternes høje produktion. Om natten derimod kan et højt iltforbrug (en høj respiration) give kritisk lave iltkoncentrationer i vandet. Specielt er fjordene herhjemme meget sårbare over for sådanne svingninger. I bunden af dem ligger der store mængder af organisk materiale – bl.a. rester af ålegræs, alger og bunddyr. Det kræver et højt iltforbrug, og efter en stille periode kan iltsvind selv på ganske lavt vand pludselig opstå fra time til time. Det viser sig som pludselig massedød af planter og dyr i området, hvor iltsvindet er opstået.



Fotos: Bent Lauge Madsen, SNS.

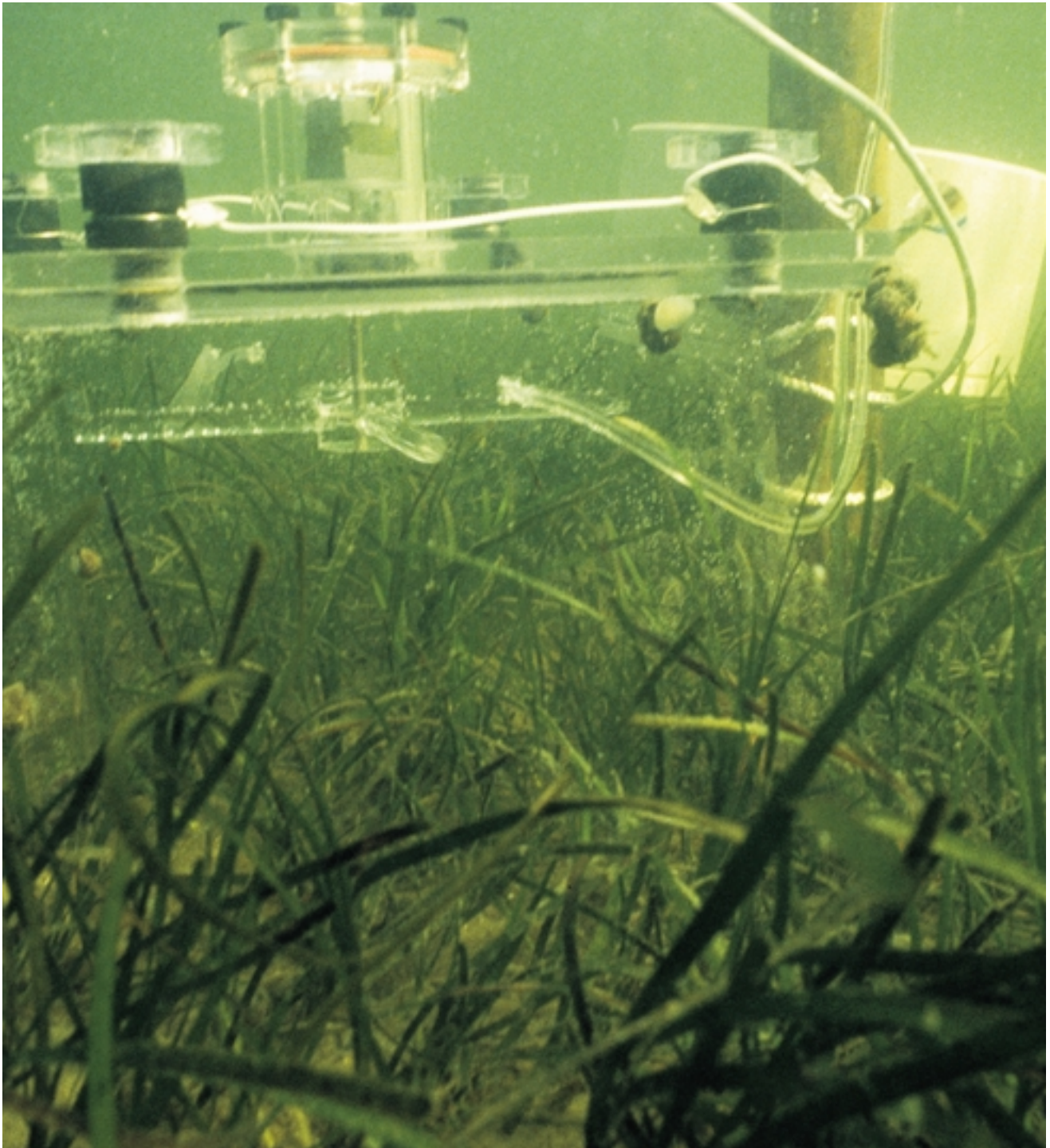
Hvad øger planternes produktion?

Havets planter skal som alle andre planter have lys, næringsstoffer, kuldioxid og vand for at udføre fotosyntese og vokse. Når solen står lavt på himlen om vinteren, er det især lyset, der begrænser algernes vækst. Om sommeren er det ofte mangel på næringsstoffer.

Det er ofte kvælstof eller fosfor, der begrænser planternes vækst. Mængden af næringsstoffer, der bliver tilført havet, bestemmer hvilket af de to næringsstoffer, der begrænser væksten.

I Kattegat, Skagerrak og de mere åbne farvande er det stort set altid kvælstof, der begrænser algernes vækst i vækstsæsonen. Jo mere kvælstof vi leder ud i Kattegat, des flere alger vokser der frem, og des højere bliver forbruget af ilt ved havbunden.

I fjordene og kystvandene er billedet anderledes. I danske rensningsanlæg fjerner vi nu effektivt fosfor fra vores spildevand. Det giver mindre fosfor til vore kystvande og det kan faktisk begrænse planternes vækst i det tidlige forår i kystvandene. Gennem sommeren og efteråret, hvor lyset og temperaturen skaber de bedste vækstbetingelser, bliver der imidlertid afgivet meget fosfor fra havbunden i kystvandene (se side 41), og derfor er det ofte kvælstof, der begrænser plantevæksten i denne periode.



Næringsstoffer bliver frigivet

Næringsstoffer bliver frigivet som et vigtigt "biprodukt" ved alle respirationsprocesser, hvor organisk materiale bliver nedbrudt. Produkterne er primært uorganiske forbindelser.

Kvælstof

Kvælstof bliver især frigivet som ammonium (NH_4^+), når organisk materiale bliver nedbrudt. Men der bliver også frigivet organiske kvælstofforbindelser, fx urea og aminosyrer, som planter også er i stand til at optage og udnytte.

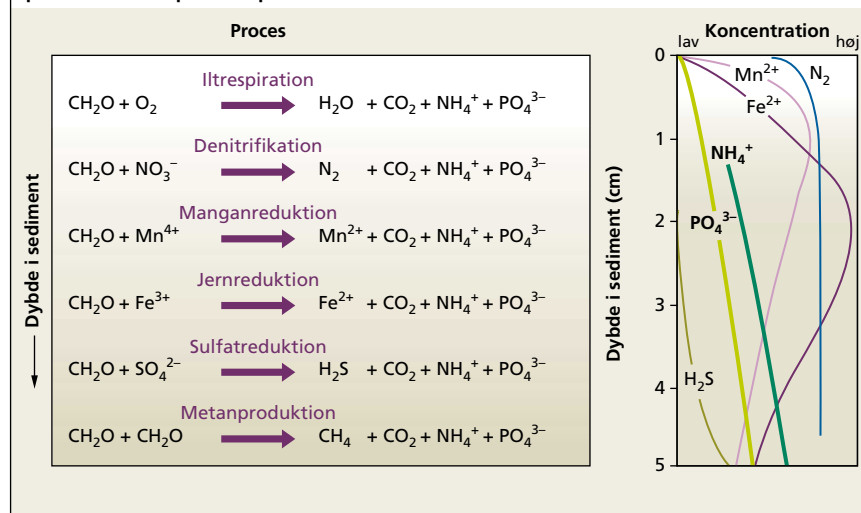
Udvekslingen af kvælstof mellem havbund og vand varierer meget gennem året og fra sted til sted. Udvekslingen af kvælstofforbindelserne er nemlig et samlet resultat af et meget kompliceret kvælstofkredsløb (Figur 6). Og kvælstofkredsløbet påvirkes i stor udstrækning af de organismer, der lever på og i havbunden, iltforholdene ved bunden, temperaturen, lysforholdene ved havbunden, mængden og kvaliteten af det organiske materiale, der kommer til havbunden etc.

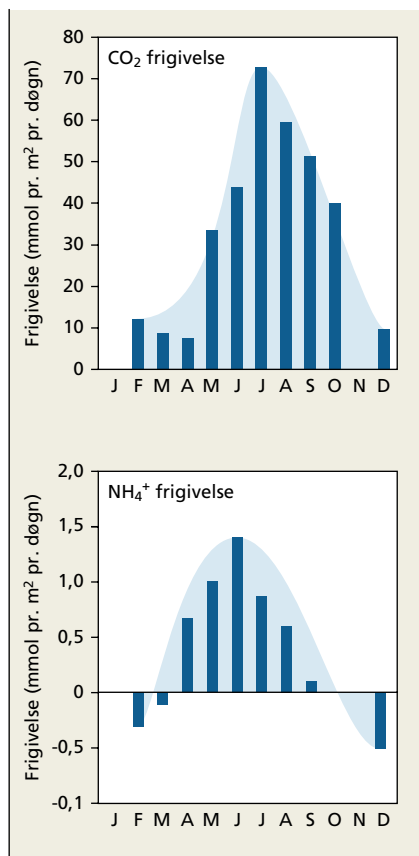
Figur 5

Når organisk materiale bliver nedbrudt, frigives der næringsstoffer. Organisk stof kan forsimplet skrives som $(\text{CH}_2\text{O})_{106}(\text{NH}_3)_{16}(\text{H}_3\text{PO}_4)$. Herfra kan man se, at bl.a. kvælstof og fosfor bliver frigivet, når det organiske stof nedbrydes. Nedenfor har vi for enkelhedens skyld valgt blot at skrive organisk stof som CH_2O .

Omsætningen af organisk stof producerer kvælstof- og fosforforbindelser langt ned i havbunden. Herfra trænger de op mod overfladen og videre ud i vandet. På overfladen af havbunden og i vandet optager planterne næringsstofferne. Det giver en typisk gradient i havbunden, hvor der er meget ammonium og fosfat dybere i sedimentet og mindre lige ved overfladen. På figuren er fordelingen af næringsstofferne vist sammen med de øvrige produkter af respirationsprocesserne i de øverste 5 cm af havbunden.

Lukker man et lille stykke havbund inde, kan man måle hvor mange næringsstoffer, den optager eller frigiver. Her er et plexiglas-kammer sat ned i en bevoksning af ålegræs. Ved løbende at tage prøver ud gennem slangerne kan man følge, om havbunden optager eller frigiver næringsstoffer i løbet af døgnet.





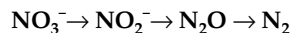
Figur 6

Figuren viser frigivelse af kuldioxid og ammonium gennem året på en station i Odense inderfjord. Produktionen af kuldioxid er her et mål for den samlede omsætning af organisk stof i havbunden. Der sker ofte en stor frigivelse af ammonium fra havbunden om sommeren, hvor omsætningen af organisk materiale er størst. Om vinteren er omsætningen af organisk stof lavere, og et bedre iltindhold i havbunden giver en bedre oxidation af ammonium ved nitrifikation. Det samlede resultat er en mindre frigivelse af ammonium fra havbunden gennem vinterhalvåret. Havbunden kan endda optage ammonium fra det overliggende vand (angivet ved de negative værdier).

Et ammoniummolekyle, der bliver produceret ved respirationsprocesserne i havbunden, kan gå mange veje. Det kan som vist blive frigivet til vandet over havbunden. Planter på havbunden, det være sig mikroskopiske alger eller store planter som ålegræs, kan optage ammoniummolekylet og indbygge det i plantebiomasse. Endelig kan nitrificerende bakterier oxidere ammonium til nitrat:



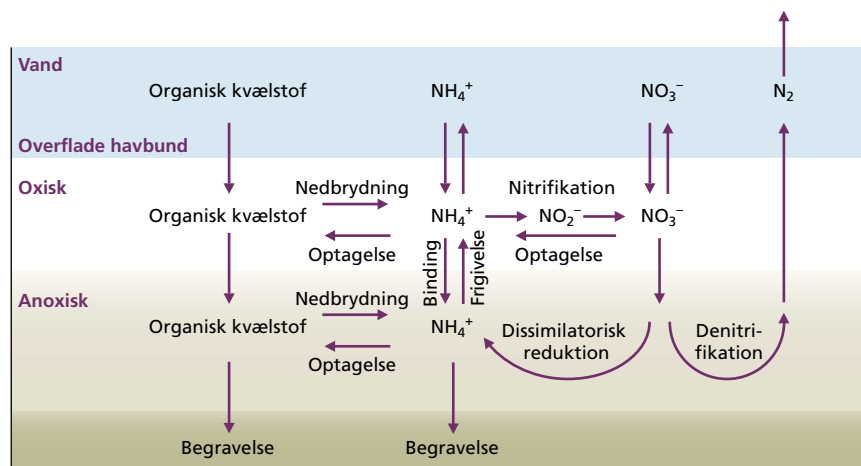
Processen sker i den øverste iltholdige del af havbunden og kaldes nitrifikation. Det producerede nitrat kan dernæst blive frigivet til vandet. Planterne kan også optage nitrat som kvælstofkilde. Og endelig kan denitrificerende bakterier bruge nitrat i deres respiration, også kaldet denitrifikation:



Herved omdannes kvælstofmolekylet til frit kvælstofgas, der søger mod atmosfæren.

Om sommeren er omsætningen af organisk materiale størst. Det betyder, at produktionen af ammonium også er størst. Da iltforholdene også ofte er dårligere i havbunden gennem sommeren, bliver kun en mindre del af den producerede ammonium nitrificeret til nitrat.

Ammonium binder sig let til lerpartikler og planterester i havbunden, men bindingen er svag, og ammonium bliver nemt frigivet igen. Havbunden holder altså dårligt på kvælstof. Derfor ser man oftest, at der er en stor frigivelse af ammonium fra havbunden til vandet om sommeren, hvor omsætningen af organisk materiale er størst.



Figur 7

Udvekslingen af kvælstofforbindelser mellem havbunden og vandsøjlen er resultatet af en ligevægt i det meget komplicerede kvælstofkredsløb.

Fosfor

Når bakterierne nedbryder organisk stof, bliver fosfor frigivet som fosfat (PO_4^{3-}). Fosfor frigives hurtigere end kvælstof fra celler, der er under nedbrydning. En del fosfor bliver derfor frigjort allerede, mens det organiske materiale synker ned gennem vandsøjlen.

I modsætning til kvælstof holder havbunden effektivt på fosfor og kan dermed forsinke eller reducere frigivelsen af fosfor. Når fosfat frigives fra organisk materiale, bindes det hurtigt til lerminerale eller forskellige metalforbindelser. Kun en ubetydelig del af det uorganiske fosfat findes opløst i porevandet i de øverste lag af havbunden.

Fosfat binder sig meget fast til aluminiumoxider, lerminerale, magnesium eller calcium. Og herfra frigives det praktisk talt ikke igen.

Fosfat bundet til jern og mangan frigives derimod let, når metallerne reduceres. Havbundens jernpulje fungerer dermed som en vigtig buffer for såvel svovlbrinte som fosfat, da oxideret jern binder begge stoffer.

Så længe der er en oxideret jernpulje i havbunden, kan den tilbageholde fosfat. Om foråret holder jernpuljen effektivt på fosfaten. Men i fjordene og de kystnære områder begynder det at knibe i løbet af sommeren. Her giver en stor omsætning i havbunden en høj produktion af svovlbrinte, der "konkurrerer" med fosfat om det tilgængelige oxiderede jern. Svovlbrinte fortrænger fosfat, der er bundet til jern. Og specielt i vore fjorde medfører det en stor frigivelse af fosfat fra havbunden om sommeren.

Jern – en vigtig buffer

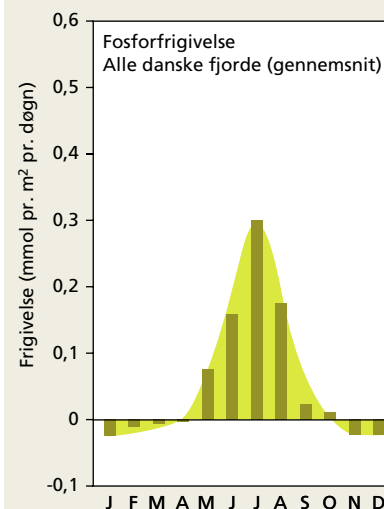
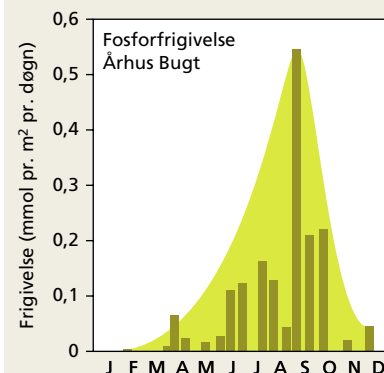
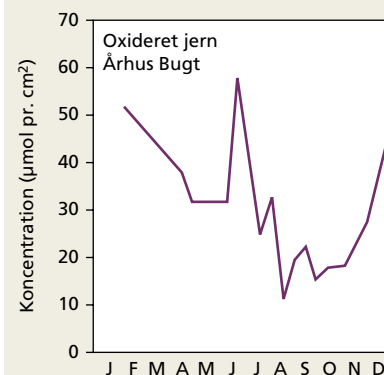
Jern er en vigtig buffer både for svovlbrinte og fosfat. Svovlbrinte reducerer oxideret jern og "skubber" derved bundet fosfat væk og ud i porevandet:



Fra porevandet bevæger fosfat sig op mod overfladen af havbunden og videre ud i det overliggende vand. I fjorde og kystvande, hvor produktionen af svovlbrinte er stor gennem sommeren, resulterer det i en stor frigivelse af fosfat fra havbunden i løbet af sensommeren.

Figur 8

Frigivelsen af fosfor fra havbunden er tæt knyttet til puljen af oxideret jern. I de mere åbne farvande holder den oxiderede jernpulje længe og forsinker derfor ofte frigivelsen af fosfor til om efteråret, hvor den oxiderede jernpulje er opbrugt. I den øverste del af figuren er jernpuljen og fosforfrigivelsen målt gennem et år i Århus Bugt som et eksempel på et mere åbent farvand. Frigivelsen er størst i løbet af sensommeren hvor havbundens pulje af oxideret jern er mindst. I vore fjorde og kystnære områder, hvor produktionen af svovlbrinte er høj, bliver jernpuljen hurtigt opbrugt. I disse områder ser man derfor typisk en stor frigivelse af fosfor allerede midt på sommeren. Det ser man på den nederste figur, hvor et gennemsnit af fosforfrigivelsen fra alle danske fjorde i 2000 er vist.



I de mere åbne farvande er produktionen af svovlbrinte mindre. Her kan den oxiderede jernpulje forsinke frigivelsen af fosfat fra havbunden i flere måneder. Fosforfrigivelsen sker typisk i det sene efterår, hvor iltningsskapiteten og dermed puljen af oxideret jern er opbrugt. I de mere åbne farvande bliver frigivelsen af fosfor fra havbunden på den måde adskilt i tid fra omsætningen af organisk materiale.

Det har stor økologisk betydning, at havbunden kan tilbageholde fosfor i forårsmånederne, hvor fosfor kan begrænse planteproduktionen – specielt i fjordene (se side 37). Om efteråret er effekten af øgede fosformængder i vandsøjlen ofte betydelig mindre, da det især er tilgængeligheden af kvælstof og lys, der begrænser produktionen på dette tidspunkt.

Dyr og planter påvirker omsætningen

Dyr og planter har stor indflydelse på omsætningen af næringsstoffer og transporten af dem mellem havbund og vand.

Mikroalger, der lever på selve havbunden (benthiske mikroalger), er eksempelvis vidt udbredte. De skal ikke have meget lys for at lave fotosyntese. Algernes produktion af ilt og deres opbygning af organisk stof påvirker i høj grad stofomsætningen i havbunden og præger udvekslingen af næringsstoffer mellem havbunden og vandet. Når algerne producerer ilt om dagen, trænger ilten dybere ned i havbunden. Det øger omsætningen med ilt og oxidationen af bl.a. ammonium.

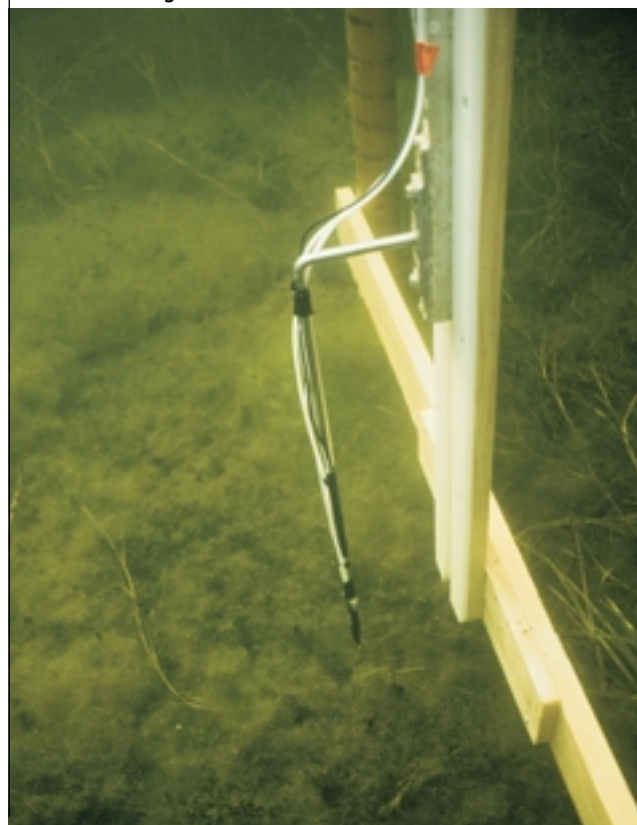
De benthiske mikroalger optager samtidig næringsstoffer, der trænger op fra havbunden. De fungerer på den måde som et meget effektivt filter, der reducerer eller stopper transporten af næringsstoffer fra havbunden til vandsøjlen. I perioder får algerne ikke dækket deres behov for næringsstoffer fra havbunden, og de optager derfor også næringsstoffer fra vandet. Det giver en transport af næringsstoffer ned i havbunden, hvilket er karakteristisk for foråret (se fx Figur 14). Om sommeren derimod holder de bundlevende alger dårligt på næringsstofferne, da de får mindre lys til fotosyntese. Der er simpelthen for mange planktonalger i vandet, som hindrer lyset i at nå bunden.

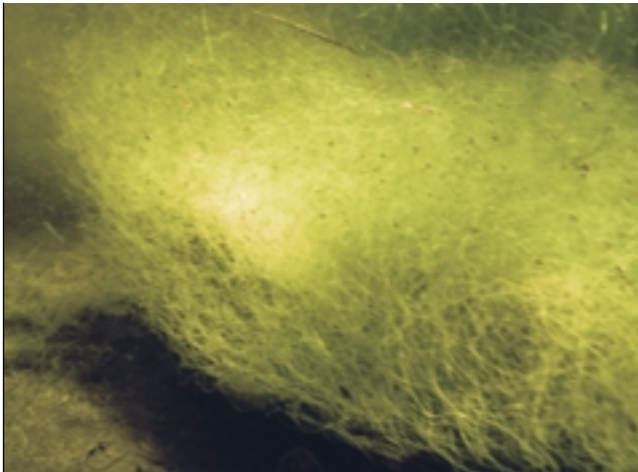
I eutrofierede områder ser man nu om dage hyppigt store mætter af makroalger, som fx trådalger eller tætte bevoksninger af søsalat. De påvirker på samme måde som de benthiske mikroalger transporten af næringsstoffer fra havbunden. Men store samlinger af løst flydende makroalger er ofte ustabile samfund, der giver ophav til store svingninger

i iltforholdene og dermed også i dynamikken af næringsstoffer i bundvandet.

Der bliver brugt meget ilt i de tykke algemætter og det giver ofte iltfrie forhold i bunden af matten. Havbunden under en sådan algematte er derfor ofte helt reduceret. Svovlbrintefronten når helt op til overfladen af havbunden og flere gange langt op i algematten. Samtidig er der masser af ammonium og fosfat i den nedre del af matten. Algerne laver nemlig ikke fotosyntese i den nederste del af matten, hvor der ikke er lys. Denne kombination kan blive en farlig cocktail. I roligt og solrigt vejr kan algematten producere så store iltbobler, at matten simpelthen letter fra bunden og flyder op til overfladen. Så er der fri adgang for både

En elektrode måler iltforholdene ned gennem en matte af krølhårstang. Små prøver af vandet i matten giver samtidig oplysninger om, hvor mange næringsstoffer og hvor meget svovlbrinte, der findes ned gennem matten.





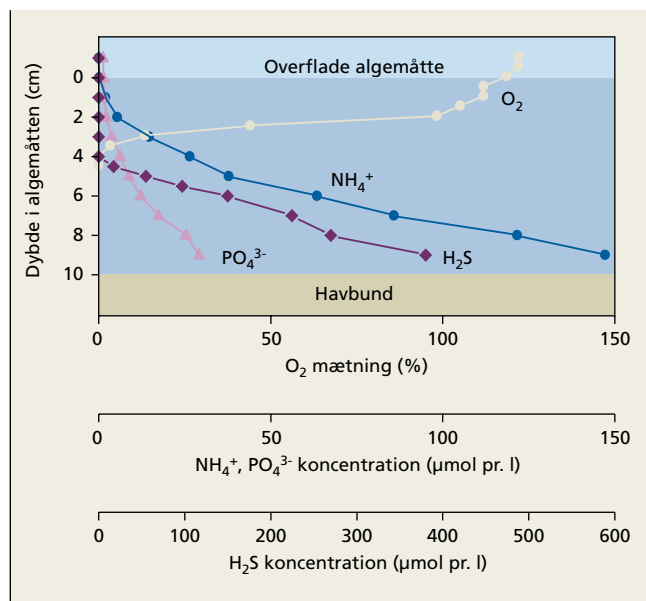
Fotos: Michael Bo Rasmussen, DMU.

Trådalger – her krølhårstang – eller store bladformede alger som søsalat kan danne tætte måtter, der helt dækker havbunden i fjorde og kystnære områder. Måtterne kan blive 30-50 cm tykke, og der er ofte helt iltfrie forhold i bunden af dem.

svovlbrinte og næringsstoffer til vandsøjlen. Det kan resultere både i en voldsom opblomstring af planktonalger, der pludselig får næringsstoffer til vækst, og en mælkehvid, iltfri vandsøjle, da oxidationen af svovlbrinte giver frit svovl (se side 32).

Som vi tidligere har set, er gravende dyr afgørende for at få jernforbindelser oxideret og er dermed medvirkende til, at havbunden har en høj oxidationskapacitet. Dyrernes grave- og pumpeaktivitet bringer endvidere iltigt vand dybt ned i sedimentet. Det forøger omsætningen i havbunden og spiller en stor rolle for både frigivelse og tilbageholdelse af næringsstoffer.

Dyrene øger også transporten af alger og andet organisk materiale ned til havbunden og koncentrerer det organiske materiale på og i havbunden. Filtrerende dyr som muslinger og søpunge suger planktonalger fra vandet og får dermed mere materiale til bunden. Dyr der lever nedgravet i havbunden, som fx sandorm, trækker endvidere det organiske materiale længere ned i havbunden.



Figur 9

I bunden af en algemåtte kan der være helt iltfrie forhold og masser af næringsstoffer, der er trængt op fra havbunden. Endvidere kan der være svovlbrinte til stede i vandet mellem algerne. Forsvinder algemåtten pludseligt, er der fri adgang for både næringsstoffer og svovlbrinte til vandet.



Foto: Søren Larsen, Fjordbæltcentret, Kerteminde.

Fjorde tilbageholder og fjerner næringsstoffer

Fjordene og kystvandene fungerer som en slags filter, der er skudt ind mellem land og det åbne hav. Et filter, der tilbageholder eller fjerner en del af de næringsstoffer, som kommer fra land eller fra atmosfæren. Det sker ved, at næringsstofferne begravnes i havbunden, indbygges i organismer eller fjernes helt gennem mikrobielle processer.

Næringsstoffer ud af kredsløbet

Som nævnt drysser der hele tiden materiale ned på havbunden. Det betyder, at havbunden konstant vokser en lille smule. Hvor der synker meget materiale ned, kan havbunden vokse 1-5 mm i højden om året. Langt størstedelen af det, der når bunden, består af sand-, ler- og gruspartikler. Det organiske materiale udgør kun en meget lille del. Afhængig af forholdene begravnes fra 5 til 40% af det tilførte organiske materiale permanent i havbunden.

Fosfor begravnes primært i havbunden som tungtopløselige metalforbindelser (eksempelvis bundet til aluminium-oxider, magnesium eller calcium). Forbindelserne holder godt fast på fosfor, og de dukker sjældent frem igen, før havbunden millioner af år senere skyder op som klipper eller vulkanøer.

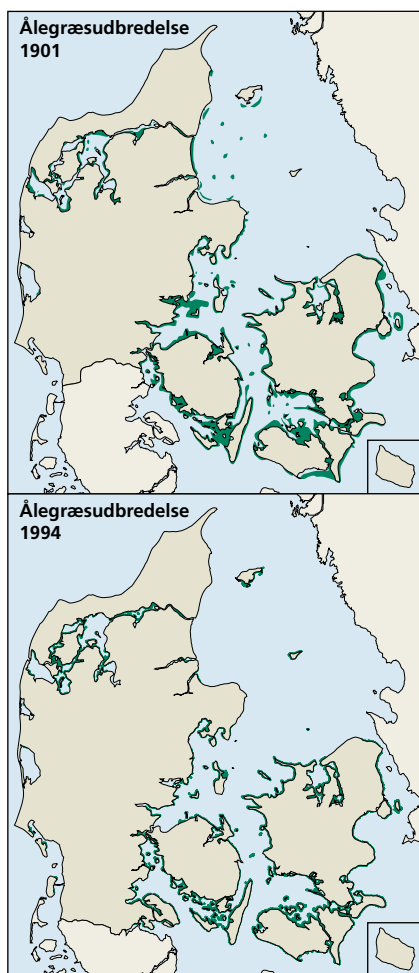
I modsætning til fosfor binder kvælstof sig kun svagt til ler og mineralpartikler, og kvælstof begravnes derfor primært i organisk form bundet til planterester. Den permanente begravelse af kvælstof er derfor langt mindre end begravelsen af fosfor. Til gengæld bliver kvælstof fjernet ved bakteriel denitrifikation.

Næringsstoffer bundet i planter og dyr

Planter og dyr på havbunden optager kvælstof og fosfor, når de vokser. Men de fleste næringsstoffer bliver frigivet igen, når organismene dør og bliver nedbrudt. Vi taler derfor om en midlertidig tilbageholdelse. Nogle af næringsstofferne bindes meget fast i bestemte dele af organismene. Det er fx ligninstoffer, der holder planter oprejst. Ligninstoffer bliver kun omsat langsomt eller slet ikke, og de holder derfor i lang tid på de bundne næringsstoffer.

Et rigt plante- og dyreliv ved havbunden holder derfor længere på næringsstofferne og forhælder den tid, det tager, før næringsstofferne atter er tilgængelige for primærproduktionen.

Fjorde virker som et filter i transporten af næringsstoffer fra land til hav. Luftfoto af Kerteminde Fjord og Kertinge Nor ved udløbet til Storebælt ved Kerteminde.



Figur 10

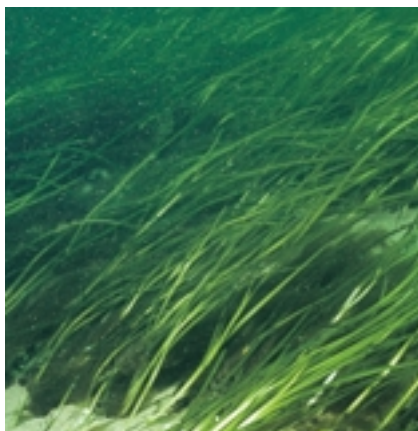
Planter på havbunden optager kvælstof og fosfor om foråret og om sommeren og binder næringsstofferne i plantebiomasse. Det giver færre næringsstoffer til planktonalgernes vækst. Planternes binding af næringsstoffer er specielt vigtig gennem foråret og sommeren, hvor der kun kommer få næringsstoffer fra land. Forsvinder planterne, bliver der flere næringsstoffer til planktonalgerne, og det giver en uheldig selvforstærkende virkning: Mange planktonalger i vandet giver ringe lysforhold ved havbunden, så større planter ikke kan vokse. Vi har set dette ske i de danske kystvande, hvor ålegræs er forsvundet fra meget store områder af havbunden.

Omvendt giver mange næringsstoffer i vandet som regel dårlige livsbetingelser for planter og dyr ved havbunden. Der kommer nemlig mange planktonalger. Planktonalgerne omsættes hurtigere og giver en hurtig re-cirkulering af næringsstofferne – de bliver hurtigt tilgængelige igen for en ny planteproduktion i vandsøjlen. Det fastholder systemet i en tilstand med mange næringsstoffer i vandet og har derfor en selvforstærkende virkning.

Kvælstoffjernelse

De denitrificerende bakterier er meget vigtige for kystvandenes kvælstofkredsløb. De omdanner nitrat til frit kvælstof. Vi udnytter bakterierne i vore rensningsanlæg, hvor de fjerner kvælstof fra spildevand, før det løber ud i vore vandløb. I fjordene og kystvandene laver bakterierne præcis samme nummer, blot under mere naturlige forhold: De reducerer mængden af plantetilgængeligt kvælstof.

Nu gør bakterierne det jo ikke blot for at gøre os alle en god tjeneste. De lever af det. De omsætter organisk stof og bruger nitrat som respirationsmiddel. Det gør de imidlertid kun, når der ikke er ilt til stede. De fleste denitrifice-





Næringsstoffer, der er bundet i havets planter, var i gamle dage en vigtig gødningskilde for bønderne. Ved strandkanten samlede de tang (bl.a. sukkertang som vist på billedet nedenfor) og ålegræs. De brugte planterne som en værdifuld næringsstofkilde på markerne.

(Carl Locher, 1895: "Der læsses tang ved Hornbæk Strand", Statens Museum for Kunst).

rende bakterier er fakultativt anaerobe: De respirerer med ilt, når det er til stede og skifter over til nitrat under iltfrie forhold (se side 18).

Der eksisterer ikke på samme måde en mikrobiel proces, der permanent fjerner fosfor fra vandmiljøet.

Gennem store dele af året er det kvælstof, der begrænser primærproduktionen i vore marine områder. Derfor har der været stor interesse for denitrifikationsprocessen og for de parametre, der regulerer aktiviteten af de denitrificerende bakterier.

I havbunden fjerner bakterierne nitrat ved denitrifikation lige under det iltede overfladelag. Bakterierne kan i princippet få nitrat fra to forskellige kilder:

- Nitrat trænger ned fra det overliggende vand og videre ned gennem det iltede overfladelag til den iltfrie zone, hvor der sker en denitrifikation. Her taler man om **denitrifikation af nitrat fra vandfasen**, og benævner det som regel D_w , hvor w står for "water".

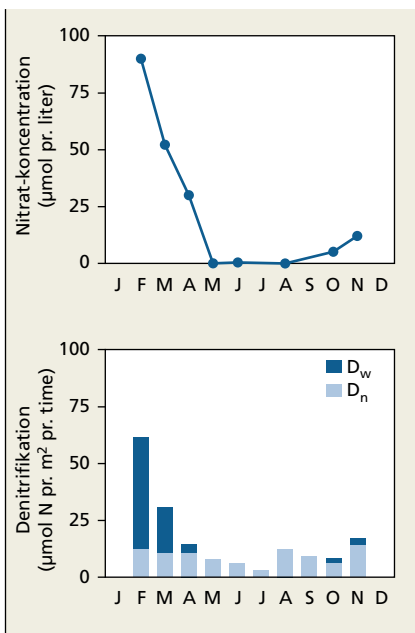
- Nitrat bliver produceret i overfladen af havbunden, hvor der er ilt til stede. Det sker ved nitrifikation (se side 40), hvor nitrificerende bakterier oxiderer ammonium til nitrat. Noget af det producerede nitrat trænger op i vandet, mens andet trænger ned i den underliggende iltfrie zone, hvor det bliver denitrificeret. Dette kalder man **koblet nitrifikation-denitrifikation**, og benævner det D_n , hvor n står for nitrifikation.

Generelt fjerner bakterierne mest kvælstof fra de danske kystvande om vinteren. Det skyldes, at der er mest nitrat i vandet i vinterhalvåret, hvor det regner mest og hvor der derfor er en stor udvaskning fra landbruget. Der kommer også en del nitrat direkte til havet med nedbøren. Om vinteren er iltforholdene i havbunden endvidere bedst. Det giver gode forhold for de nitrificerende bakterier øverst i havbunden. Den anden nitratkilde er altså også optimal gennem vinterhalvåret.



Foto: Peter Bondo Christensen, DMU.

Om sommeren bliver der ikke fjernet så meget kvælstof. Der er ikke meget nitrat i bundvandet; der kommer ikke meget fra land, og alger og større planter optager meget kvælstof fra vandet. Der er altså ikke meget nitrat, der kan trænge ned i den iltfrie del af havbunden og blive denitrificeret. Iltforholdene i havbunden bliver samtidig dårligere og dårligere i løbet af sommeren, og de nitrificerende bakterier producerer derfor mindre og mindre nitrat. Den koblede nitrifikation-denitrifikation er derfor også ringe om sommeren.



Figur 11

Denitrifikationen er ofte størst om vinteren som det ses på disse data fra Kertinge Nor. Om vinteren er koncentrationen af både nitrat og ilt høj. Denitrifikation af nitrat fra vandet (D_w) er afhængig af nitratkoncentrationen i vandet og er derfor lav om sommeren. Den koblede nitrifikation-denitrifikation (D_n) er afhængig af iltforholdene og koncentrationen af ammonium i overfladen af sedimentet. Iltforholdene er ofte dårligere om sommeren og hæmmer dermed nitrifikationen.

Opstår der iltsvind om sommeren, stopper fjernelsen af kvælstof helt. Der er ikke nitrat i bundvandet, og der er ikke ilt til at oxidere ammonium. Til gengæld fosser ammonium ud i vandet fra havbunden. Samtidig kan høje koncentrationer af svovlbriente i havbunden forgifte de nitrificerende bakterier. Når iltforholdene igen bliver normale, går der en periode, før de nitrificerende bakterier "kommer til hæfterne" igen. De nitrificerende bakterier vokser kun langsomt, og der kan gå flere uger, før der igen er en normal koblet nitrifikation-denitrifikation.

Benthiske mikroalger på havbunden påvirker denitrifikationen på flere måder. Så længe der er kvælstof nok i vandet, vil algerne iltproduktion øge nitrifikationen og dermed den koblede nitrifikation-denitrifikation. Men algerne iltproduktion betyder også, at nitrat fra vandet skal vandre længere for at

komme ned og blive denitrificeret i den iltfrie zone. Det hæmmer D_w . Endelig bruger algerne kvælstof til deres vækst. Når der ikke er meget kvælstof i vandet, konkurrerer algerne om det kvælstof, der er tilgængeligt. Om sommeren betyder det, at de benthiske mikroalger kan begrænse aktiviteten af de denitrificerende bakterier.

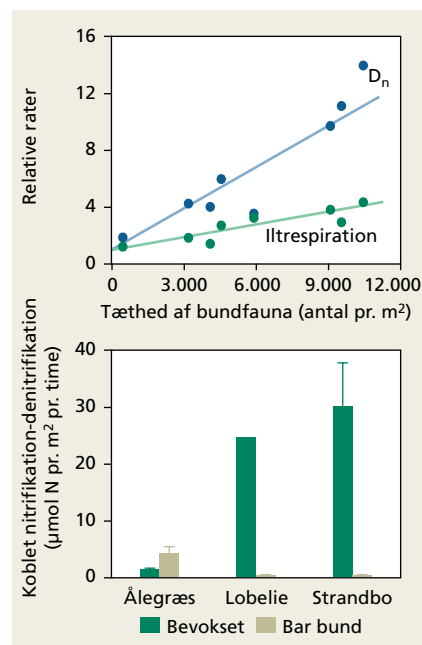
Gravende dyr kan medvirke til, at der bliver fjernet mere kvælstof. Dyrene pumper ilt ned i havbunden og stimulerer derved den koblede nitrifikation-denitrifikation. Ændrer miljøet sig i positiv retning, så vi får flere gravende dyr, kan vi derfor se frem til, at der bliver fjernet mere kvælstof fra havmiljøet.

Det er vist, at planter i søer på samme måde øger fjernelsen af kvælstof. Planterne lækker ilt over rodoverfladen til den omgivende søbund. Det øger nitrifikationen og dermed den koblede nitrifikation-denitrifikation i

Figur 12

Gravende dyr øger omsætningen af organisk stof og stimulerer den koblede nitrifikation-denitrifikation (D_n). Dyrene medvirker altså til, at der fjernes mere kvælstof fra havmiljøet. Jo flere dyr, der er pr. kvadratmeter havbund, jo mere kvælstof bliver der fjernet.

Rodfæstede planter kan frigive ilt fra roddernes overflade. På den måde kan de øge kvælstoffjernelsen ved at stimulere den koblede nitrifikation-denitrifikation. Det er bl.a. vist flere gange hos planter i søer. Men det ser ikke ud til, at den samme mekanisme gør sig gældende for ålegræs i havet. Målinger viser, at ålegræs ikke stimulerer en øget fjernelse af kvælstof – snarere tværtimod. Her har man målt en større denitrifikation på en bar bund ved siden af ålegræsbedene.



rodzonen. De seneste data tyder på, at der ikke sker den samme stimulerende af kvælstoffjernelsen i rodzonen af planterne i kystvandene.

Fjordene løser ikke kvælstofproblemet

I Danmark har vi gjort mange tiltag for at udlede mindre kvælstof til de marine områder. Bl.a. er der gennemført to vandmiljøplaner, der har kostet samfundet et flercifret milliardbeløb. Der bliver nu ført mindre kvælstof fra land til havet, men der kommer stadig for meget kvælstof til havet.

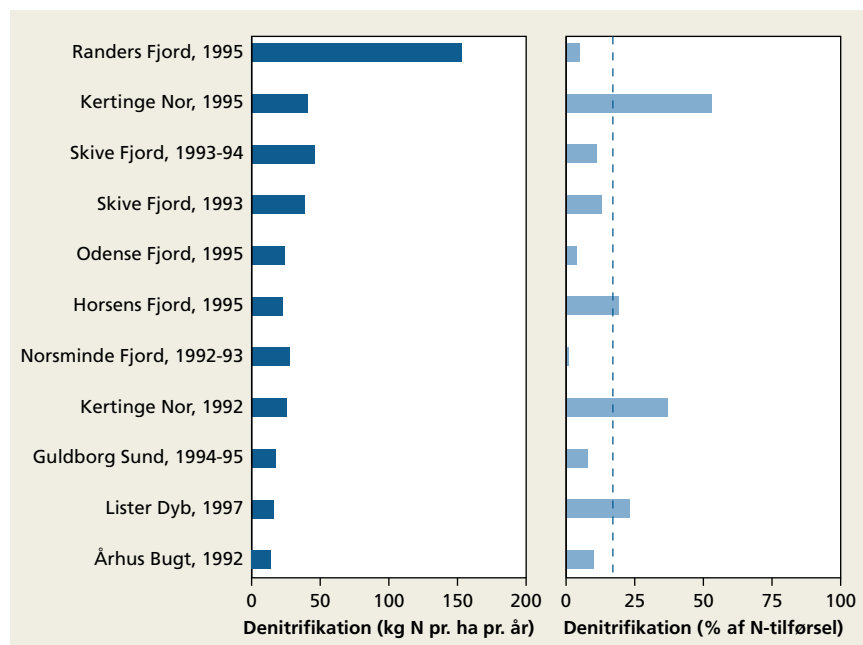
Under vandets transport fra land til hav bliver kvælstof bl.a. fjernet i rensningsanlæg, i våde enge, i vandløb, i søer og endelig i fjordene. Gennem de sidste 6-7 år er denitrifikationen systematisk blevet målt i en lang række danske fjorde. Det giver os gode muligheder for at vurdere, hvor meget den

naturlige fjernelse af kvælstof betyder i forhold til belastningen fra land.

I Danmark fjerner de denitrificerende bakterier i havbunden hvert år fra ca. 1,4 ton kvælstof pr. km² i Århus Bugt til ca. 4,0 ton kvælstof pr. km² i Skive Fjord. De mange data viser, at der som gennemsnit hvert år bliver fjernet ca. 2 ton kvælstof pr. km² i de indre danske farvande (Figur 13).

Kun en af de målte lokaliteter "stikker af" fra det generelle billede. Det er Randers Fjord, hvor der bliver fjernet rigtigt meget kvælstof. Men Randers Fjord får også tilført kolossale mængder nitrat og organisk stof med Gudenåen, der afvander et meget stort område af Jylland. Fjordsystemet har derfor ideelle muligheder for en stor denitrifikation af nitrat fra vandfasen. Endvidere er der gode iltforhold og høje koncentrationer af ammonium, der giver en høj aktivitet af koblet nitrifikation-denitrifikation.

Det er overraskende, at den absolutte kvælstoffjernelse varierer så lidt fra område til område. Til gengæld modtager de forskellige fjorde og kystafsnit vidt forskellige mængder kvælstof. Derfor varierer det meget fra fjord til fjord, hvor meget kvælstof der bliver fjernet ved denitrifikation, når man udtrykker det i forhold til den mængde kvælstof, som fjorden modtager. I fjorde, der får tilført mange næringsstoffer, og som har en hurtig vandudskiftning, fjerner denitrifikationen kun få procent af det tilførte kvælstof. I kystvande, der har en langsom vandudskiftning, og som kun modtager lidt kvælstof, fjernes derimod en betydelig større del af det tilførte kvælstof (Figur 13).



Figur 13

Som et gennemsnit for 9 forskellige danske fjorde fjerner denitrifikationen ca. 2 ton kvælstof pr. km² pr. år. Kun Randers Fjord har en markant højere rate.

Af det kvælstof, der løber ud i fjordene bliver der i gennemsnit fjernet 18 % i fjordene, før vandet løber videre ud i de indre danske farvande. Til sammenligning bliver mindre end 2 % af det kvælstof, der løber til vandløbene, fjernet ved denitrifikation i vandløbets bund. For søer har man målt, at denitrificerende bakterier i søbunden kan fjerne op til 40 % af det kvælstof, der ledes til søen.



Havbunden afspejler miljøtilstanden

Overvågning af havbunden

I fjordene og i kystvandene er transporten af vand ofte stor, og vandet bliver derfor hyppigt udskiftet. Det betyder, at man på samme sted kan måle på vidt forskellige vandmasser med få timers mellemrum. I modsætning til vand-søjlen bliver havbunden liggende og "lagrer" på en måde informationer om den miljøtilstand, der har påvirket fjorden eller havområdet gennem dage, måneder og år.

Havbunden har siden 1998 været inddraget i den nationale overvågning af miljøtilstanden i de danske fjorde. Der bliver målt på nogle få centrale parametre, og det er målet at se på, hvordan miljøtilstanden ændrer sig, hvis man ændrer belastningen af havmiljøet med næringsstoffer. Formålet med målingerne er at skelne mellem den udvikling, der er forårsaget af henholdsvis år til år variationer i klimaet og længerevarende ændringer i tilførslen af næringsstoffer.

Havbundens iltningsskapacitet eller svovlbrintebufferkapacitet (se side 28) er en af de parametre, man måler i overvågningsprogrammet. Man kan sige, at iltningsskapaciteten er et mål for havbundens sundhedstilstand. En bedre sundhedstilstand medfører, at havbun-

den gennem længere tid kan modstå dårlige iltforhold i vandet, uden at der sker et udslip af svovlbrinte. Stiger havbundens iltningsskapacitet gennem en årrække, betyder det, at havbunden modtager mindre organisk stof. Iltningsskapaciteten beskriver dermed indirekte udviklingen i havområdets belastning.

I overvågningsprogrammet måler man også, hvor langt nede i havbunden svovlbrintefronten befinder sig på forskellige tider af året. Iltningsskapaciteten og svovlbrintefronten beskriver tilsammen puljen af oxideret jern, og dermed om havbundens tilstand er oxideret eller reduceret.

Endelig måler man havbundens iltforbrug, samt hvor mange uorganiske næringsstoffer (kvælstof og fosfor) der bliver afgivet eller optaget af havbunden gennem året. Ved at måle optagelse og frigivelse af ilt og næringsstoffer i lys og mørke får man også et mål for, om der er benthiske mikroalger på havbunden, og hvor aktive de er. De nyeste data viser, at de bundlevende alger betyder meget for, hvor mange næringsstoffer der bliver frigivet fra havbunden i de danske farvande. Det er et emne, der helt sikkert vil få større opmærksomhed i de kommende års forskningsindsats.

Figur 14

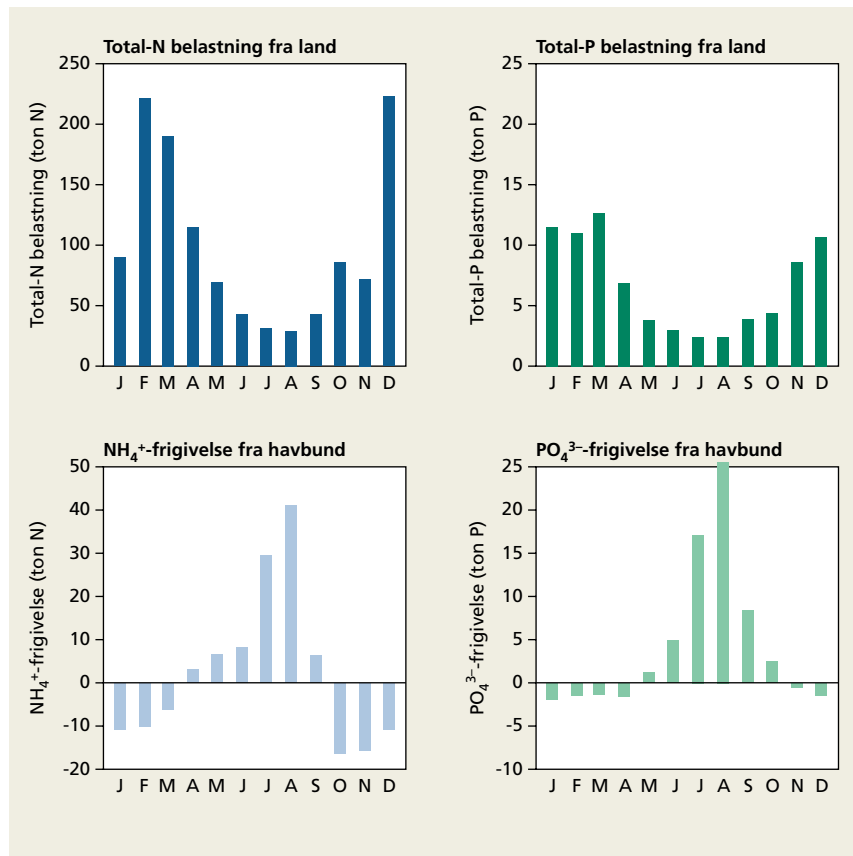
De øverste figurer viser belastningen fra land af hhv. kvælstof og fosfor til Lister Dyb i Vadehavet. På de nederste figurer er udvekslingen af kvælstof og fosfor over havbunden i Lister Dyb målt gennem det samme år.

Om sommeren kommer der flere næringsstoffer fra havbunden end fra land. Man kalder det for den "interne belastning". Udenfor sommermånederne optager havbunden både kvælstof og fosfor. Det skyldes bl.a. forøget nitrifikation og denitrifikation i vinterhalvåret, og at benthiske mikroalger på havbundens overflade optager meget kvælstof og fosfor om foråret. Endelig binder oxiderede jernforbindelser fosfor i vinterhalvåret. Bemærk forskelle i aksernes størrelse.

Sølilje filtrerer partikler ud af vandet. Den kan vandre hen over havbunden.



Foto: Peter Bordo Christensen, DMU.



Næringsstoffer fra havbunden

Havbunden er i konstant "dialog" med det overliggende vand og livet heri. Man kan derfor ikke fyldestgørende beskrive et fjordsystem uden også at inddrage havbunden. Et enkelt eksempel er havbundens evne til at tilbageholde eller frigive næringsstoffer. Havbunden kan være et dræn for næringsstoffer eller en kilde til næringsstoffer. Næringsstofferne påvirker primærproduktionen i det overliggende vand og kan være altafgørende for fx produktionen af planktonalger og udvikling af iltsvind.

Gennem sommerperioden kan havbunden fx frigive mere kvælstof og fosfor, end der kommer fra land (Figur 14). Når kilden fra land "tørre ud" om sommeren, bliver kilden i havbunden ganske vigtig for det marine økosystem. Skal man vurdere grundlaget for primærproduktionen i et givet område, må man derfor også inddrage puljen af næringsstoffer i havbunden.

Selv om man fjerner eller reducerer tilførslen af næringsstoffer fra land, kan havbunden i kystvandene lagre næringsstoffer og dermed være en betydelig kilde gennem flere år. Vi



Foto: Peter Bando Christensen, DMU.

kalder det for den "interne belastning", til trods for at næringsstofferne jo i sidste ende stammer fra land. Den interne belastning kan fastholde søer i en næringsrig tilstand i mange år efter, at tilførslen af næringsstoffer fra land er bragt ned. Vi har målt, at der også kommer mange næringsstoffer op fra bunden i mange fjorde. Vi mangler imidlertid flere undersøgelser af næringsstofpuljerne i havbunden og omsætningen af disse, før vi kan vurdere i hvor lang tid den interne belastning kan fastholde fjordene i en næringsrig tilstand. Målingerne bliver

et grundlag for en nærmere modellering og forståelse af de enkelte fjordsystemer.

Modellering af processer i havbunden

Efter mange års forskning har vi efterhånden et indgående kendskab til de mange processer, der indgår i stofomsætningen i havbunden. Faktisk kan vi nu beskrive den enkelte proces meget nøjagtigt med kemiske og matematiske ligninger.

Hver enkelt proces afhænger af en lang række forskellige faktorer. Det er

Det grønne mosdyr, den orange-hvide dødningehånd, ånderørene fra muslingerne og de lilla skorper af en kalkrødalge, der vokser på de store sten, giver en farverig havbund – her på 20 meters dybde.

fx vigtigt, om bakterierne har adgang til den rigtige føde, den energikilde, de skal bruge og et substrat at sidde på. Man skal også vide, hvor hurtigt bakterierne arbejder (proces hastigheder), og om der er omstændigheder, der påvirker bakteriernes aktivitet (eksempelvis om der er ilt til stede, temperaturens rolle osv.).

Når man har styr på det, skal man vide, hvordan de enkelte processer påvirker hinanden. Det er et større puslespil, der skal lægges. Man skal beskrive hver enkelt lille brik grundigt, før de kan samles til det færdige billede, der beskriver stofomsætningen i havbunden. I vores verden er den

enkelte brik beskrevet af kemiske og matematiske ligninger. Vi siger derfor, at vi har konstrueret en matematisk model af stofprocesserne i havbunden.

Det er nu lykkedes at få det store puslespil til at gå op, og modellerne kan med stor nøjagtighed beskrive de enkelte processer, sådan som de faktisk er målt i havbunden.

Vi kan derfor bruge modellerne til at vende blikket fremad og forudsige, hvad der vil ske med processerne og forholdene i havbunden, hvis der kommer færre næringsstoffer til vores vandområder. Sedimentmodellerne kan fx forudsige, hvor meget mindre organisk stof, der skal tilføres

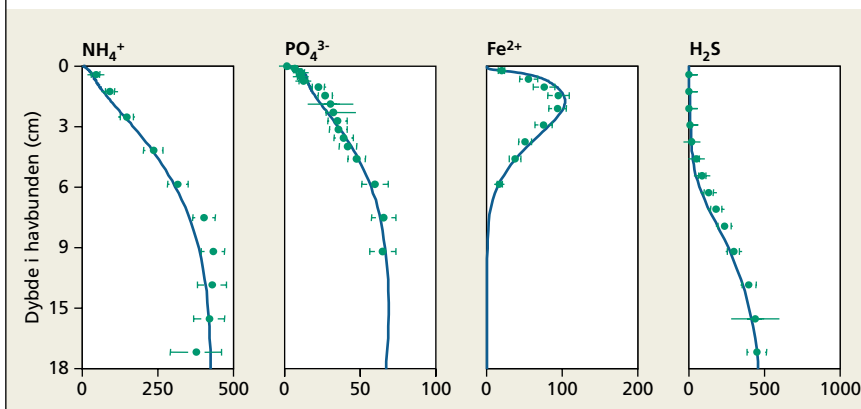
havbunden, før den genvinder en given sundhedstilstand. Eller hvordan iltforholdene bliver i havbunden ved en bestemt belastning. Eller hvor meget kvælstof denitrifikationen vil fjerne ved en bestemt udvikling i belastningen.

Modellen kan med andre ord bruges til at fortælle politikerne, hvilken indsats der er nødvendig for at genopbygge en sund havbund. En havbund, der ikke er præget af dårlige iltforhold, som kan være opvækstområde for et varieret plante- og dyreliv, og som kan understøtte et sundt og varieret liv i vandsøjlen.

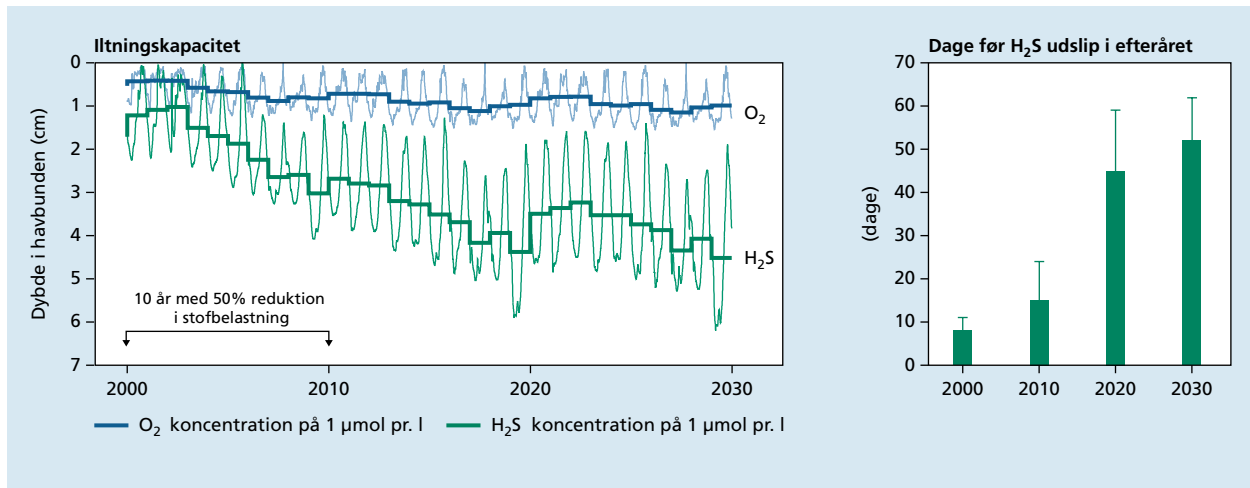
Figur 15

Dusinvis af matematiske og kemiske ligninger ligger til grund for en model, der nu kan beskrive stofomsætningen i havbunden. De enkelte ligninger tager højde for processens hastighed under varierende forhold. Modellen fremkommer ved at sammenkoble alle ligningerne.

På figuren kan man se, at modellen meget præcist beskriver koncentrationsforholdene for en række forskellige stoffer i havbunden. De grønne punkter viser målte koncentrationer af de viste stoffer, mens den blå linie viser modellens forudsigelser. Det er et tjek på, at modellen meget nøjagtigt kan beskrive virkeligheden ud fra nogle ganske få parametre. Går man nu ind i modellen og fx ændrer på mængden af organisk stof, der kommer ned til havbunden, kan modellen forudsige, hvad der vil ske.



Model fremskriver udviklingen



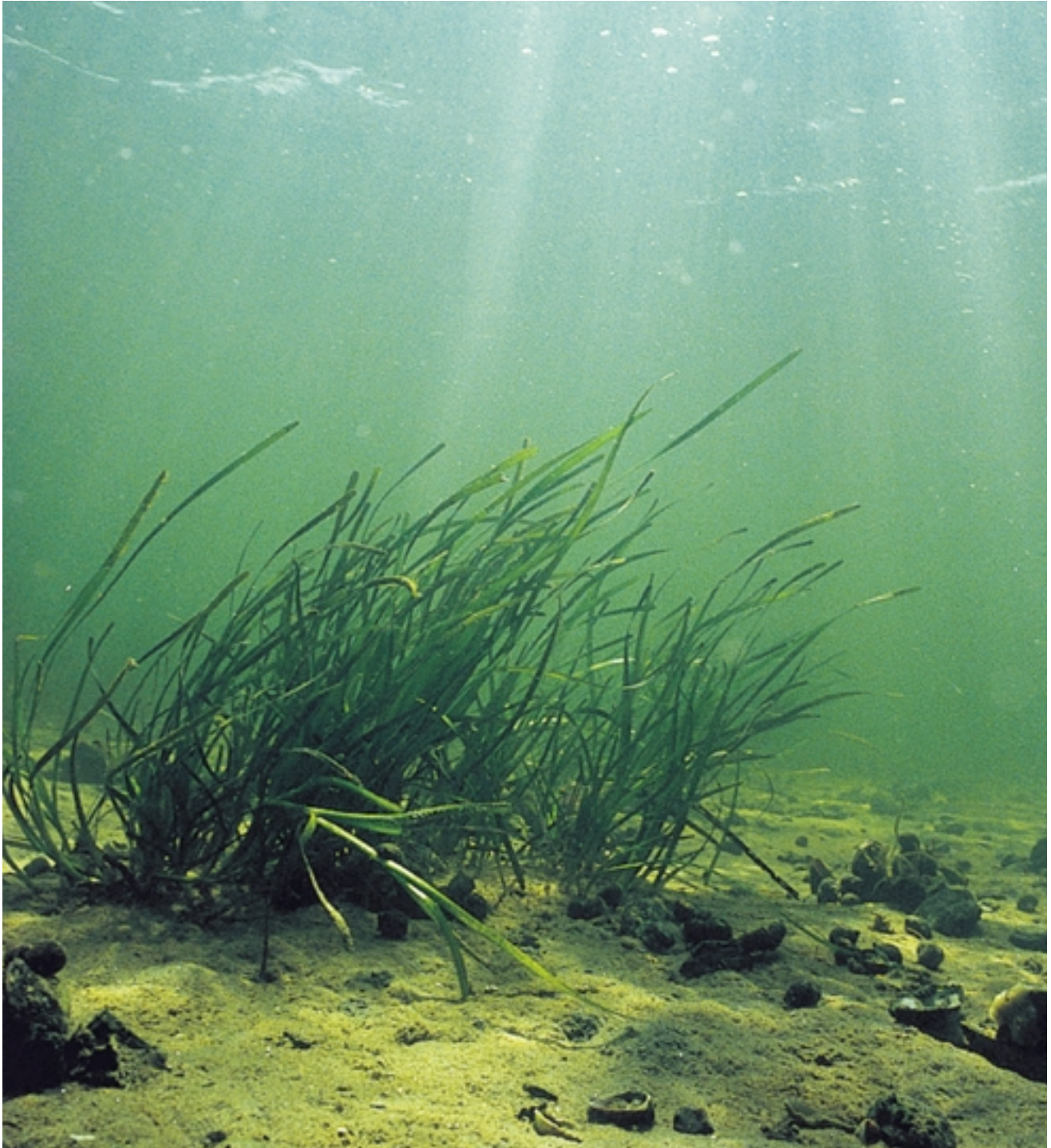
Hvad sker der med havbunden og havmiljøet, hvis vi gennem 10 år belaster havbunden med 50 % mindre organisk materiale, end vi gør i dag? Sådanne spørgsmål kan modellen eksempelvis besvare. Figuren til venstre beskriver, hvordan havbundens ilt- og svovlbrinteforhold samt dens iltningsskapacitet vil udvikle sig i Århus Bugt, hvis vi nedsætter belastningen af organisk materiale til bunden med 50 % gennem en periode på 10 år. Kurverne viser i hvilken dybde af havbunden, man vil finde 1 µmol pr. liter af hhv. ilt og svovlbrinte.

En mindre belastning vil medføre, at ilten gennemsnitlig trænger 4 mm længere ned i sedimentet (fra 5 mm til 9 mm). Det synes ikke af meget, men svarer trods alt næsten til en fordobling.

Dybdegrænsen for svovlbrinte udvikler sig endnu mere markant i samme periode. Svovlbrintefronten rykker længere ned i havbunden, gennemsnitlig fra en dybde på 14 mm til en dybde på 36 mm. Med andre ord bliver afstanden mellem ilt og svovlbrinte i havbunden betydelig større pga. af den nedsatte belastning. Der udvikler sig altså en zone i havbunden, hvor der hverken er ilt eller svovlbrinte til stede. Laget danner en slags bufferzone mellem de to fronter. Bufferzonen fyldes i stedet for op med oxideret jern.

Den mindre belastning af havbunden med organisk materiale og de bedre iltforhold afspejler sig derfor også i havbundens iltningsskapacitet, der stiger markant gennem årene. Specielt interessant er forholdene i efterårsperioden (september-oktober). I denne periode vil kapaciteten altid være lav og risikoen for iltsvind stor (se side 29).

Som forholdene er i dag (beskrevet som et gennemsnit af tilstanden fra 1990 til 1999), er bufferzonen mellem ilt og svovlbrinte om efteråret på 2 mm. Havbunden kan om efteråret kun modstå 8 (± 3) dage med dårlige iltforhold, før svovlbrinte slipper ud af bunden og op i bundvandet. Reducerer man belastningen med 50 % over en ti-årig periode (i modellen beskrevet som perioden 2000-09), opbygger havbunden i efterårsperioden en bedre iltningsskapacitet. Bufferzonen mellem ilt og svovlbrinte forøges med hele 16 mm og havbunden kan modstå 49 (± 12) dage med dårlige iltforhold. Det er formentlig tilstrækkeligt til at holde svovlbrinte nede i havbunden under normale vejrforhold og dermed opretholde et varieret plante- og dyreliv ved og i havbunden.



Bakterier – en vigtig del af livet

Bakterier er bitte små celler. De fleste er end ikke synlige med det blotte øje. Det er primitive organismer, der kan leve som enkelte celler i modsætning til celler fra planter og dyr, der må fungere i en flercellet organisme for at overleve. De findes overalt omkring os – endda i vores egen organisme – og har været her på jorden i milliarder af år.

Selvom bakterierne er små og primitive, er de en magtfuld gruppe, der kan være ansvarlig for såvel gode som grusomme hændelser. En enkelt bakteriecelle kan sjældent udrette noget betydningsfuldt. Men bakterier har evnen til at dele sig hurtigt, og en enkelt celle kan på få timer blive til tusinder.

Fra børn af er vi blevet advaret mod bakterier: "Husk at vaske hænder!". Vi har alle mærket virkningen af sygdomsfremkaldende bakterier, og de fleste af os har fået antibiotika for at slå dem ned.

Men bakterier laver også meget nyttigt. I denne temarapport har vi set, hvordan bakterierne nedbryder

det organiske materiale og returnerer næringsstoffer og kuldioxid til livets kredsløb. Vi har også nævnt eksempler på, hvordan vi udnytter bakterierne i vores hverdag. Bl.a. bruger vi de nitrificerende og denitrificerende bakterier i vore biologiske rensningsanlæg til at fjerne kvælstof, før spildevandet løber ud i vore vandløb. Vi bruger også bakterierne i vores kompostbunke til at omsætte vores haveaffald.

Anvendelsen af bakterierne og deres egenskaber er kolossalt omfattende, og det ligger uden for denne temarapports rammer at beskrive denne del. Men studier af bakterier i havbunden har i høj grad øget vores forståelse af de forskellige bakterietypers stofskifte. Man har bl.a. opdaget, at de samme bakterietyper kan fungere i den arktiske havbund, hvor temperaturen året rundt er mindre end minus 1 grad og i områder af dybhavet, hvor mere end 80 grader varmt vand vælder op fra jordens indre. Kan bakterierne tilpasse sig livet i disse ekstreme omgivelser, må deres enzymer være i stand til at tilpasse sig og virke under de gældende forhold. Det kan udnyttes kommercielt – eksempelvis ved at bruge enzymerne til at fjerne snavs fra vores vasketøj i henholdsvis koldt og varmt vand.

Der er sket meget inden for mikrobiologien, siden hollænderen Antonie van Leeuwenhoek i 1684 beskrev noget "småkravl", han havde set i sit meget primitive mikroskop, og som senere skulle vise sig at være bakterier. Men først i slutningen af 1900-tallet skete der for alvor en udvikling inden for den mikrobiologiske videnskab takket være udviklingen af bedre mikroskoper. Og med udviklingen af elektronmikroskoper og ved brug af radioaktive sporstoffer er udviklingen i det 20. århundrede

gået stærkt. Alligevel dukker der stadig nye typer af bakterier op, og nye veje til at omsætte stoffer bliver stadig opdaget og beskrevet.

Hovedlinierne i stofomsætningen, som vi kender dem, er beskrevet i denne temarapport. Men det overordnede billede bliver fra år til år mere og mere kompliceret med flere og flere tværgående procesmuligheder på grund af nye opdagelser. Og den udvikling vil helt sikkert fortsætte. Vi kender langt fra alle bakteriernes hemmeligheder hverken i havbunden eller andre steder, hvor de lever.

Ved at lede efter nye bakterietyper og arbejde med dem, vi allerede kender, er vi muligvis i stand til at frembringe bakterier, der vil være overordentligt værdifulde for vores og naturens levevilkår. Eksempelvis er der beskrevet en bakterie, der både er i stand til at nitrificere og denitrificere. Bakterien kan altså kombinere to forskellige stofskiftetyper. Kan man opdyrke og optimere denne bakterie, vil det have en stor økonomisk værdi for rensning af spildevand og fjernelse af kvælstof i naturen. Der er også bakterier, der kan nedbryde olie og meget giftige organiske stoffer, og måske kan vi i fremtiden bruge dem til at rydde op efter menneskeskabte forureninger.

Bakterierne er en helt nødvendig del af vores hverdag, og uden dem ville livet ikke gå videre. I havbunden omsætter bakterierne de tons og atter tons af organisk materiale, der drysser ned på den og giver dermed ophav til nyt organisk materiale. Tænk på det, næste gang du bader i havet: For hvert skridt du tager, træder du på millioner af nyttige bakterier, der arbejder for dig, og måske har uanede fremtidige anvendelsesmuligheder.

Bakterierne er sidste led i en kæde af organismer, der omsætter organisk materiale i havbunden. Bakterierne danner næringsstoffer og kuldioxid, som planterne bruger til at danne nyt organisk materiale vha. solens energi.



Sammenfatning

Havbunden er en vigtig del af det marine økosystem. Man kan ikke fyldestgørende beskrive fjorde og kystnære systemer uden at inddrage havbunden og processerne heri.

Bakterier i havbunden afslutter nedbrydningen af det organiske materiale, der drysser ned på bunden. Bakterierne er derfor helt nødvendige for at gen-danne uorganiske næringsstoffer og kuldioxid – byggesten for nyt liv.

Bakterierne benytter sig af forskellige metoder til at få energi. Aerobe bakterier ånder med ilt. Anaerobe bakterier udnytter i stedet forbindelser som nitrat, oxideret mangan, oxideret jern og sulfat i deres stofskifte. Der er også bakterier, der får energi ved at producere metan.

Bakterierne i havbunden er en vigtig del i livets kredsløb og er bl.a. nødvendige for at vi kan få mad på bordet.

I kystområder bliver omkring halvdelen af det organiske materiale omsat ved respiration med ilt, mens den anden halvdel bliver nedbrudt ved anaerob respiration.

Sulfatreduktion er den anaerobe respirationsproces, der omsætter mest organisk materiale. Restproduktet ved processen er svovlbrinte, der er giftigt for planter og dyr. En stor del af den ilt, havbunden optager, går til at oxidere svovlbrinte. Det er dog sjældent, at svovlbrinte og ilt kommer i direkte kontakt med hinanden. Ofte sker oxidationen gennem en række komplicerede processer, der involverer oxiderede og reducerede former af jern og mangan.

Havbundens indhold af jern spiller en stor rolle ved at binde og tilbageholde svovlbrinte. Jernpuljen hindrer svovlbrinte i at nå op til overfladen af havbunden, og udskyder oxidationen af svovlbrinte til om efteråret.

Hvor svovlbrintefronten når helt op til overfladen af havbunden, ser man det såkaldte liglagen. Hvide svovlbakterier lever lige på grænsen mellem ilt og svovlbrinte. De får energi ved at oxidere svovlbrinten fra havbunden med ilten i bundvandet.

I sådanne situationer ligger produktionen af metan også højt oppe i havbunden. Det giver store metanbobler i havbunden, og man får en bundvending, hvis metanboblerne pludseligt frigives til vandet. Metanboblerne trækker sedimentpartikler og svovlbrinte med op i vandet. Det giver omfattende fiske-død selv højt oppe i vandsøjlen.

Næringsstofferne, der frigives fra det organiske materiale, kan være en vigtig kilde for primærproduktionen i vandet. I de åbne farvande, hvor der er meget oxideret jern i havbunden, kan jernpul-

jen tilbageholde fosfor. I fjordene og de kystnære områder, er den oxiderede jernpulje imidlertid ikke stor, og havbunden frigiver store mængder fosfor gennem sommeren. Da kvælstof kun bindes svagt til partikler i havbunden, frigives der også meget kvælstof fra havbunden gennem sommeren.

I mange fjorde bliver næringsstofferne fra havbunden det vigtigste bidrag for havets planter gennem sommeren, hvor der ikke kommer mange næringsstoffer fra land. Det er derfor nødvendigt at medregne bidraget fra havbunden, hvis man skal vurdere den samlede belastning med næringsstoffer af et vandområde.

Denitrifikation (respiration med nitrat) betyder ikke meget for omsætningen af organiske stof i havbunden. Men processen er økologisk vigtig, idet den fjerner kvælstof fra havmiljøet. Nitrat bliver lavet om til frit kvælstof, der damper af til atmosfæren som gas.

Denitrifikation fjerner fra 2 til 50% af det kvælstof, fjordene modtager fra land og fra atmosfæren. Som et gennemsnit bliver det til 18% beregnet for 9 forskellige danske fjorde. Kattegat får tilført for meget kvælstof, men denitrifikation i fjordene dæmper altså kun i begrænset omfang det problem.

De enkelte processer i omsætningen af organisk materiale i havbunden kan nu efter mange års forskning beskrives i en model. Modellen kan fx forudsige, hvad der sker med havbundens ilt- og svovlbrinteforhold, hvis man øger eller reducerer belastningen med organisk materiale eller næringsstoffer. Modellen kan bruges til at fortælle politikerne hvilken indsats, der er nødvendig for at genopbygge en sund havbund med gode iltforhold, hvor dyr og planter trives.

Supplerende litteratur

Havmiljøet under forandring?

Christensen, P.B. (ed.), 1996.
Havforskning fra Miljøstyrelsen, nr. 61.

Bacterial Biogeochemistry. The Ecophysiology of Mineral Cycling.

Fenchel, T., King, G. og Blackburn, H., 1998.
Academic Press.

Det første liv. Livets oprindelse og tidlige udvikling.

Fenchel, T., 2000.
Gad, København, 290 pp.

Produktion og forekomst af svovlbriente i Mariager Fjord 1998.

Fossing, H. og Christensen, P.B., 1998.
Faglig rapport fra DMU, nr. 270.

Marine områder 2000 – Miljøtilstand og udvikling.

Henriksen, P. (ed.), 2001.
Faglig rapport fra DMU, nr. 375.

Havmiljøet ved årtusindeskiftet.

Lomstein, B. (ed.), 1999.
Olesen & Olesen, Fredensborg, 176 pp.

Eutrophication in Coastal Marine Ecosystems.

Richardson, K. and Jørgensen, B.B., 1996.
American Geophysical Union, Washington, DC.

Hjemmesider

Afdeling for Marin Økologi

http://www.dmu.dk/1_om_dmu/2_afdelinger/3_hav/

NOVA, Teknisk anvisning for marin overvågning

Kapitel 14, Sediment - ilt og næringsstoffer

http://www.dmu.dk/1_om_dmu/2_tvaer-funk/3_fdc_mar/programgrundlag/tekanv/tekniskanv.asp

Desuden kan et stort antal publikationer og informationer findes på DMU's hjemmeside: <http://www.dmu.dk>, Miljøstyrelsens hjemmeside: <http://www.mst.dk>, og amternes hjemmesider.

Tidligere TEMA-rapporter fra DMU

- 17/1998: Olieeftersforskning og miljø i Vestgrønland**
David Boertmann m.fl., 56 sider, Kr. 80,-.
- 18/1998: Bilisme og miljø – en svær balance**
Mette Jensen m.fl., 48 sider, Kr. 60,-.
- 19/1998: Kemiske stoffer i landbruget**
John Jensen m.fl., 32 sider, Kr. 40,-.
- 20/1998: Naturen og landbruget**
Rasmus Ejrnæs m.fl., 76 sider, Kr. 100,-.
- 21/1998: Skov og skovvandløb**
Nikolai Friberg, 32 sider, Kr. 40,-.
- 22/1998: Hvordan står det til med naturen?**
Michael Stoltze, 76 sider, Kr. 100,-.
- 23/1998: Gensplejsede planter**
Christian Damgaard m.fl., 40 sider, Kr. 60,-.
- 24/1999: Danske søer og deres restaurering**
Martin Søndergaard m.fl., 36 sider, Kr. 50,-.
- 25/1999: Tropisk diversitet – skov og mennesker i Ecuador**
Flemming Skov m.fl., 48 sider, Kr. 60,-.
- 26/1999: Bekæmpelsesmidler – anvendelse og spredning i miljøet**
Betty Bügel Mogensen m.fl., 64 sider, Kr. 80,-.
- 27/1999: Giftige alger og algeopblomstringer**
Hanne Kaas m.fl., 64 sider, Kr. 80,-.
- 28/1999: Dyreplankton i danske farvande**
Torkel Gissel Nielsen m.fl., 64 sider, Kr. 80,-.
- 29/1999: Hvor kommer luftforureningen fra?**
Jytte Illerup m.fl., 32 sider, Kr. 40,-.
- 30/1999: Bundmaling til skibe – et miljøproblem**
Signe Foverskov m.fl., 48 sider, Kr. 60,-.
- 31/2000: CO₂ – Hvorfra, hvorfor, hvor meget?**
Jes Fenger, 40 sider, Kr. 40,-.
- 32/2000: Risiko og usikkerhed – miljø og fødevarer**
Hans Løkke, 52 sider, Kr. 50,-.
- 33/2000: De gode, de onde og de grusomme bakterier**
Bjarne Munk Hansen m.fl., 60 sider, Kr. 40,-.
- 34/2000: Planter i vandløb – fortid, nutid og fremtid**
Annette Baattrup-Pedersen, 36 sider, Kr. 40,-.
- 35/2000: Fugle i Tøndermarsken – bestandsudvikling og landbrug**
Lars Maltha Rasmussen m.fl., 50 sider, Kr. 50,-.
- 36/2001: Modeller i miljøkemien – hvad kan de bruges til?**
Patrik Fauser m.fl., 40 sider, Kr. 40,-.
- 37/2001: Borte med blæsten?
Modeller til vurdering af luftforurening**
Jørgen Brandt m.fl., 56 sider, Kr. 50,-.
- 38/2001: Minedrift og miljø i Grønland**
Poul Johansen m.fl., 56 sider, Kr. 50,-.
- 39/2002: Rådyret – fra fåtallig til almindelig**
Carsten Riis Olesen m.fl., 60 sider, Kr. 50,-.
- 40/2002: Barrierer i landskabet**
Aksel Bo Madsen m.fl., 56 sider, Kr. 50,-.
- 41/2002: Sne, is og 35 graders kulde
Hvad er effekterne af klimaændringer i Nordøstgrønland?**
Hans Meltofte m.fl., 88 sider, Kr. 80,-.

De enkelte hæfter i serien "TEMA-rapport fra DMU" beskriver resultaterne af DMU's forskning inden for et afgrænset område. Rapporterne er skrevet på letforståeligt dansk og henvender sig til alle, der er interesseret i miljø og natur. Serien er udformet så den kan bruges i undervisningen i folkeskolens ældste klasser og i gymnasiet.

Danmarks Miljøundersøgelser

Danmarks Miljøundersøgelser – DMU – er en forskningsinstitution i Miljøministeriet. DMU's opgaver omfatter forskning, overvågning og faglig rådgivning inden for natur og miljø.

Danmarks Miljøundersøgelser

Postboks 358
Frederiksborgvej 399
4000 Roskilde
Tel: 46 30 12 00
Fax: 46 30 11 14

Direktion
Personale- og Økonomisekretariat
Forsknings- og Udviklingssektion
Afdeling for Systemanalyse
Afdeling for Atmosfærisk Miljø
Afdeling for Marin Økologi
Afdeling for Miljøkemi og Mikrobiologi
Afdeling for Arktisk Miljø

Danmarks Miljøundersøgelser

Postboks 314
Vejsløvej 25
8600 Silkeborg
Tel: 89 20 14 00
Fax: 89 20 14 14

Afdeling for Terrestrisk Økologi
Afdeling for Ferskvandsøkologi

Danmarks Miljøundersøgelser

Grenåvej 12, Kalø
8410 Rønne
Tel: 89 20 17 00
Fax: 89 20 15 14

Afdeling for Landskabsøkologi
Afdeling for Kystzoneøkologi

Publikationer:

DMU udgiver temarapporter, faglige rapporter, arbejdsrapporter, tekniske anvisninger, årsberetninger samt et kvartalsvis nyhedsbrev, DMUnyt. En database med DMU's aktuelle forsknings- og udviklingsprojekter er tilgængelig på: www.dmu.dk.

I årsberetningen findes en oversigt over årets publikationer. Årsberetning og DMUnyt kan ses på DMU's hjemmeside eller fås ved henvendelse på telefon 46 30 12 00.