

Hver reduktionsproces giver bakterierne energi, og slutproduktet er kvælstof på gasform, der afgasser til atmosfæren.

Denitrifikationen er ikke særlig vigtig for omsætningen af organisk stof i havbunden. Normalt bliver mindre end 10% af det organiske stof omsat ved denitrifikation. Til gengæld betyder processen meget for kvælstofbalancen i marine økosystemer. Processen fjerner nemlig permanent kvælstof fra vandmiljøet, da den dannede kvælstofgas afgasser til atmosfæren. Det giver mindre kvælstof til planternes vækst.

Nogle gange er slutproduktet ved denitrifikationen lattergas og ikke frit kvælstof. Det er det bl.a. i kystnære områder, der får tilført meget organisk materiale. Det er en uheldig udvikling. Lattergas er nemlig en skadelig drivhusgas, der bl.a. gør betydelig større skade på ozonlaget end kuldioxid.

Mangan- og jernreduktion

Den nyeste forskning viser, at reduktionen af oxideret mangan og jern spiller en vigtig rolle for omsætningen af organisk materiale i kystnære farvande. Specielt er respiration med oxideret jern vigtig. I de danske farvande tegner respirationen med jern sig for op til 1/3 af den samlede anaerobe respiration. I Århus Bugt er det vist, at ca. 20% af den samlede stofomsætning i havbunden (dvs. summen af den aerobe og anaerobe respiration) sker ved bakteriernes anaerobe respiration med oxideret jern.

Sulfatreduktion

Sulfatreduktion er den respirationsproces, der giver mindst energi, men processen er alligevel kolossalt vigtig for omsætningen af organisk stof i havbunden. Sulfatreduktionen tegner sig for op til 70% af den samlede anaerobe respiration i kystnære sediment, og ca. 40% – ofte en del mere – af alt organisk materiale i havbunden oxideres ved sulfatreduktion. Men der er også meget sulfat i havvandet. Typisk er der 100-150 gange mere sulfat end ilt i havvandet. Sulfat vaskes ud fra bjergene med regnvandet og opkoncentreres i havet.

Omsætningen af organisk stof med sulfat er særligt betydningsfuld om sommeren og efteråret (fra juli til november). I den periode er temperaturen høj, og de andre respirationsmidler i havbunden er stort set opbrugt. Op til 75% af den samlede årlige sulfatreduktion sker i løbet af sommeren og efteråret.



Foto: Patrik Fauser, DMU.

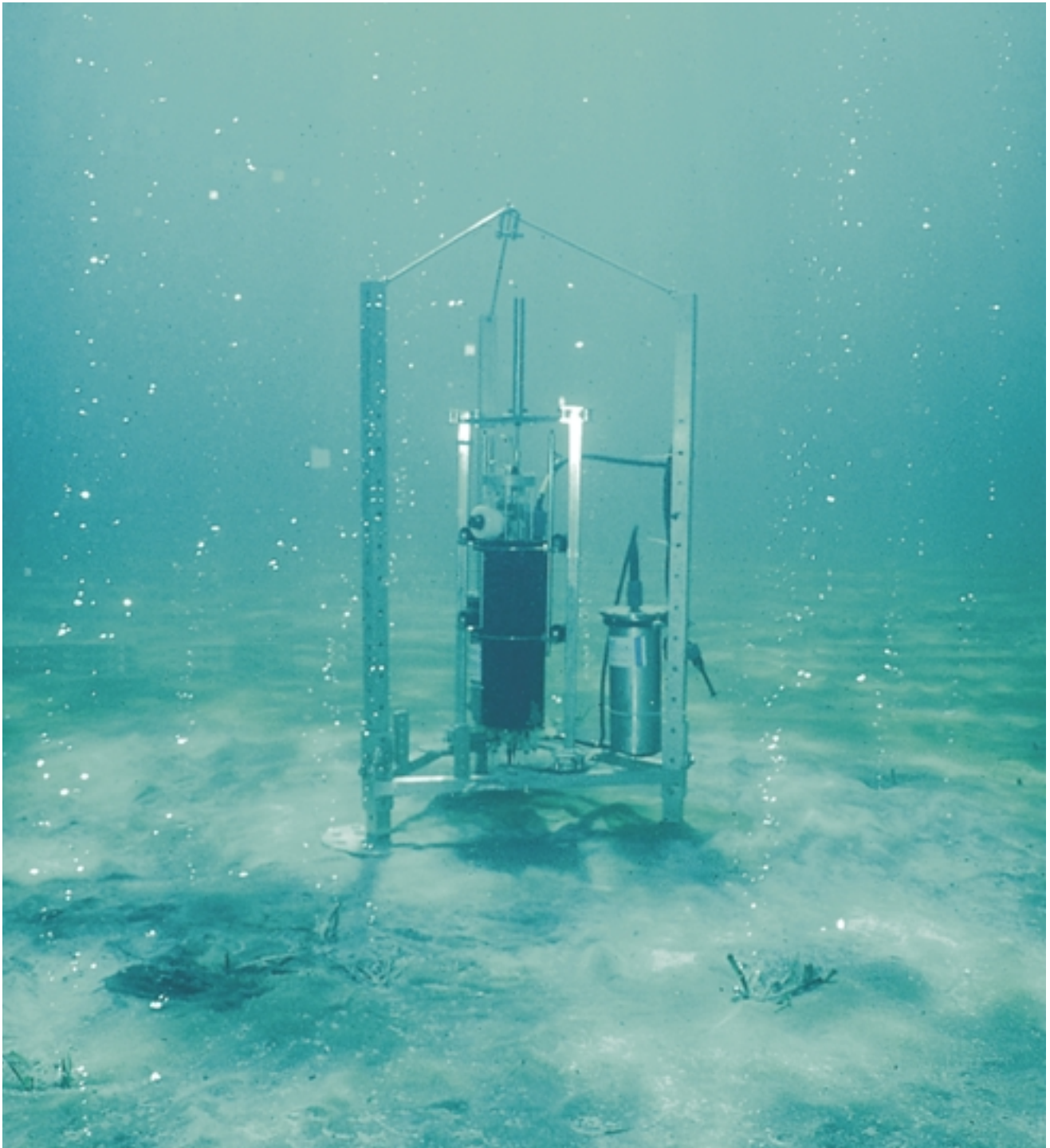
Man udnytter bakteriernes specielle stofskifte til at fjerne kvælstof i moderne biologiske rensningsanlæg. Ved først at tilføre ilt til spildevandet stimulerer man de nitrificerende bakteriers oxidation af ammonium til nitrat. Derefter fjerner man ilt fra spildevandet, og nu kan denitrificerende bakterier omdanne nitrat til frit kvælstof, der damper af til atmosfæren og som derfor ikke belaster miljøet.

Sulfatreduktionen producerer svovlbrinte som restprodukt. Svovlbrinte er giftigt for planter og dyr og skal derfor helst oxideres, inden det når op til overfladen af havbunden. Havbundens indhold af jern spiller en vigtig rolle i denne proces, og de to stoffer indgår i en række komplicerede processer, der bl.a. bestemmer havbundens udseende og dens evne til at modstå dårlige iltforhold (se side 29).

Metanproduktion

Produktion af metan sker altid nede under den sulfatholdige zone. I områder med en stor nedsynkning af organisk stof, er stofomsætningen også stor. Her sker metanproduktionen tæt ved overfladen af havbunden. Produktionen af metan kan danne store metanbobler i sedimentet, og det fører nu og da til bundvendinger (se side 33). I bunden af søer, hvor der er meget lidt sulfat, er produktionen af metan betydelig højere end i havbunden. I søer ser man derfor ofte metanbobler fra bunden. Vi kalder det for *sumpgas*.

Metanproduktionen kan ske ved to forskellige processer. Ved den ene proces bliver kuldioxid reduceret til metan af brint. Der er altså tale om en respirationsproces, hvor det er kuldioxid (CO₂), der er respirationsmidlet og brint (H₂), der er elektrondonoren. Den anden proces kræver ikke noget respirationsmiddel, idet halvdelen af det organiske kulstof oxideres til kuldioxid, mens den anden halvdel reduceres til metan (Figur 2). Denne proces adskiller sig altså fra respirationsprocesserne og kaldes derfor en forgæringproces.



Ilt til restprodukterne

Iltforholdene i bundvandet lige over havbunden er afgørende for livet ved og i havbunden, og afgørende for, hvordan omsætningen af organisk stof forløber i havbunden. Mængden af ilt i bundvandet er bestemt af balancen mellem tilførsel og forbrug af ilt.

Der kommer ilt til vandet, når ilt fra atmosfæren opløses i overfladevandet. Der kommer også ilt til vandet, når planterne i havet laver fotosyntese. Men det sker kun til de vanddybder, hvor der er lys nok til planternes fotosyntese. Den dybere del af vandsøjlen får kun tilført ilt, når overfladevandet blander sig med bundvandet.

Ilt bliver forbrugt, når dyr, planter og bakterier respirerer i vandsøjlen og i havbunden, og når ilt kemisk oxiderer reducerede forbindelser. Hvor meget ilt, der bliver brugt, er bestemt af, hvor meget organisk stof der tilføres

fra land og fra planternes produktion i havet. Endvidere spiller en række forhold som strøm og lagdeling i vandet en stor rolle.

Overfladevandet kan faktisk også tabe ilt til atmosfæren, hvis planternes fotosyntese producerer så meget ilt, at koncentrationen i vandet overstiger koncentrationen i atmosfæren. Ved en meget høj iltproduktion kan planterne ligefrem danne egentlige iltbobler, der forsvinder til atmosfæren. Det ser man fx tydeligt i akvarier, hvor små iltbobler ofte frigives fra vandplanternes blade. Man ser det også på havbunden ved lavere vanddybder, hvor mikroskopiske alger på selve havoverfladen (benthiske mikroalger) kan lave en hel tæt perleplade af iltbobler.

Når mikroskopiske alger på havbunden laver fotosyntese, danner de ofte små iltbobler. Boblerne hvirvler op til vandets overflade når de bliver tilpas store.

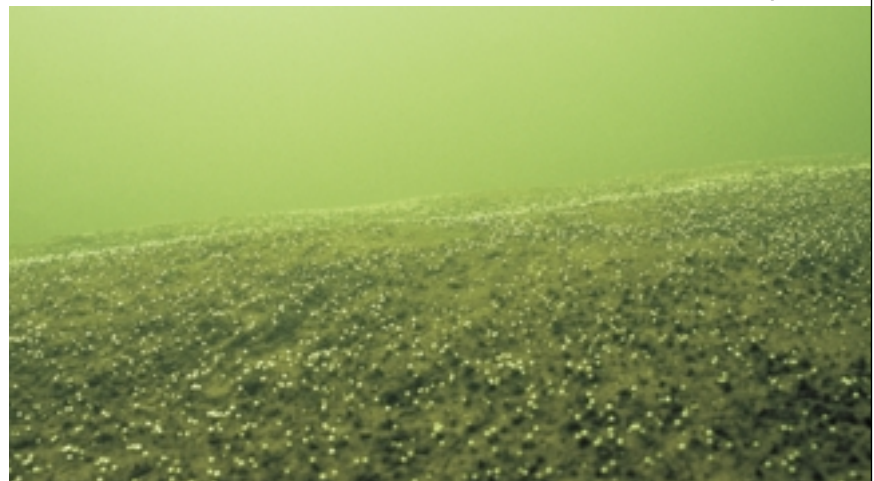
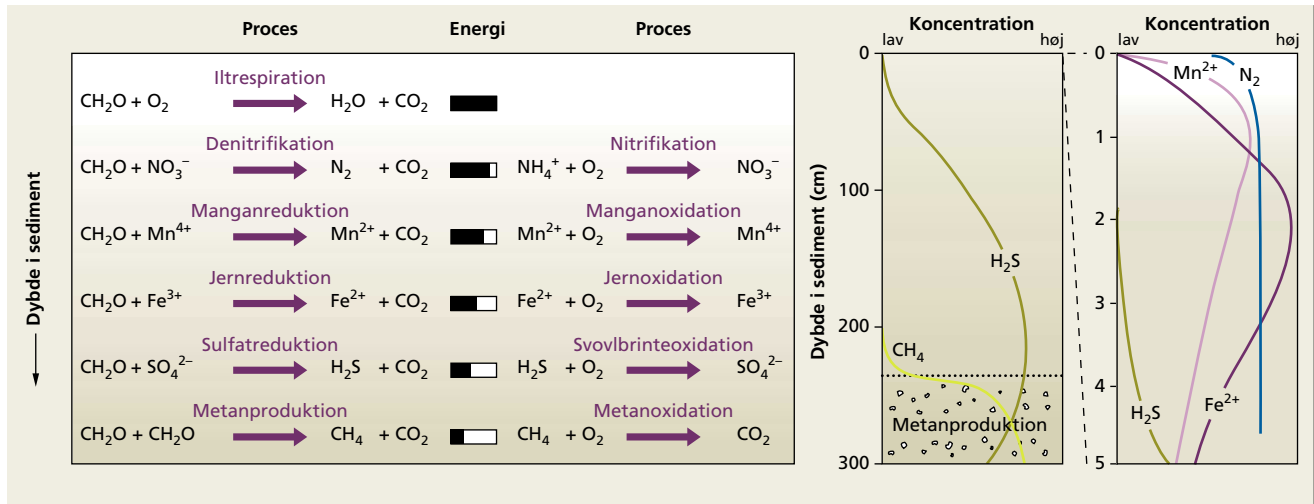


Foto: Peter Bondo Christensen, DMU.

En lille fjernstyret robot kan med bittesmå elektroder måle iltforholdene i havbunden selv på store vanddybder.



Figur 3

Forbrug af ilt i havbunden

Som vi tidligere har set, producerer den anaerobe respiration en række restprodukter (reducerede mangan-, jern- og svovlforbindelser samt metan, se Figur 2). Disse reducerede forbindelser indeholder energi. Energien stammer fra det organiske stof, der blev nedbrudt ved den anaerobe respiration og er så at sige en "rest", da alt energi i det organiske materiale ikke bliver frigivet ved den anaerobe respiration. Når de reducerede forbindelser oxideres med et mere effektivt oxidationsmiddel længere oppe i havbunden, bliver den bundne energi frigivet. Det er oxidation af metan, der giver mest energi, mens oxidationen af ammonium giver mindst (Figur 3). Der bliver frigivet mest energi, hvis oxidationen sker med ilt.

Omkring halvdelen af det ilt, havbunden optager, går til at oxidere de uorganiske restprodukter. Selve oxidationen sker enten ved en kemisk reaktion eller gennem en proces, hvor bakterier er involveret.

Kun i de allerøverste lag af havbunden sker der en oxidation direkte med ilt. Det er derfor ikke helt korrekt når det af Figur 3 fremgår at eksempelvis svovlbrinte oxideres med ilt. Der sker derimod en lang række komplekse oxidations- og reduktionsprocesser i den øverste del af havbunden, hvor respirationsmidlerne optræder på hhv. oxiderede og reducerede former (Figur 4). Men på et eller andet tidspunkt bliver der brugt ilt til at oxidere de reducerede restprodukter. På den måde bruges der i sidste ende ilt til omsætningen af alt organisk materiale i havbunden. Og man måler da også ofte havbundens iltoptagelse som et udtryk for den samlede respiration i havbunden.

De anaerobe respirationsprocesser producerer forskellige reducerede forbindelser (Mn^{2+} , Fe^{2+} , H_2S , CH_4); angivet i den venstre del af figuren.

Dybdefordelingen af restprodukterne er vist på den højre del af figuren, hvor detaljerne i de øverste 5 cm er vist yderst til højre. Den indbyrdes fordeling af produkterne er bestemt af respirationsprocessernes dybdefordeling.

Oxidation af ammonium (nitrifikation) falder lidt uden for billedet. Det er nemlig frit kvælstof (N_2) og ikke ammonium, der er restprodukt fra denitrifikationen. Ammonium bliver produceret ved alle respirationsprocesserne og indeholder energi nok til at en specialiseret gruppe bakterier, nitrifikanterne, kan udnytte det (se side 15).

De lyse kasser angiver energiudbytet ved oxidation af de reducerede restprodukter. Man ser, at der er et omvendt forhold mellem energiudbytet ved respirationsprocesserne og energiudbytet ved oxidationsprocesserne af restprodukterne.

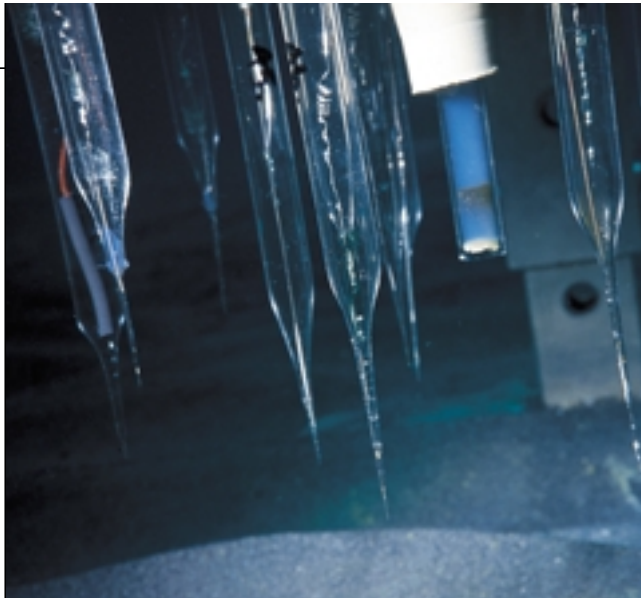


Foto: Jens Gundersen, Unisense.

Diameteren af mikroiltelektroderne er mindre end et hår. De måler iltforholdene i vandet lige over havbunden og i den øverste del af havbunden.

Respiration og energi

Går man i detaljer med de kemiske ligninger for de enkelte processer, kan man vise, at energiuudbyttet ved den anaerobe respiration og den efterfølgende oxidation af det reducerede produkt giver samme energi, som den aerobe respiration.

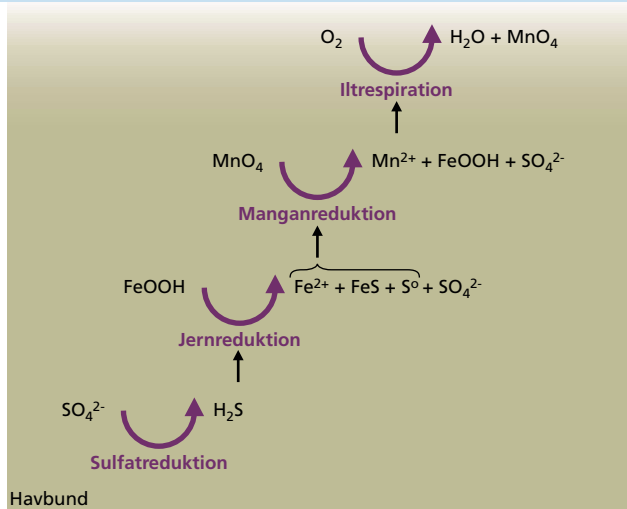
I det følgende er vist et eksempel med aerob respiration (respiration med ilt) af organisk stof, i forhold til anaerob respiration ved sulfatrespiration med efterfølgende oxidation af svovlbrinte. Den energi, der opnås ved den enkelte reaktion, er udtrykt i kilojoule (kJ).

	kJ/reaktion
A) Iltrespiration	
$2 (\text{CH}_2\text{O}) + 2 \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$	-1000
B) Sulfatrespiration	
$2 (\text{CH}_2\text{O}) + \text{SO}_4^{2-} + 2 \text{H}^+ \rightarrow 2 \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{S}$	-260
C) Oxidation af svovlbrinte	
$\text{H}_2\text{S} + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_4^{2-} + 2 \text{H}^+$	-740

Lægger man B) og C) sammen, ser man, at den anaerobe respiration med efterfølgende oxidation af restproduktet både ligningsmæssigt og energimæssigt giver samme resultat som respiration med ilt.

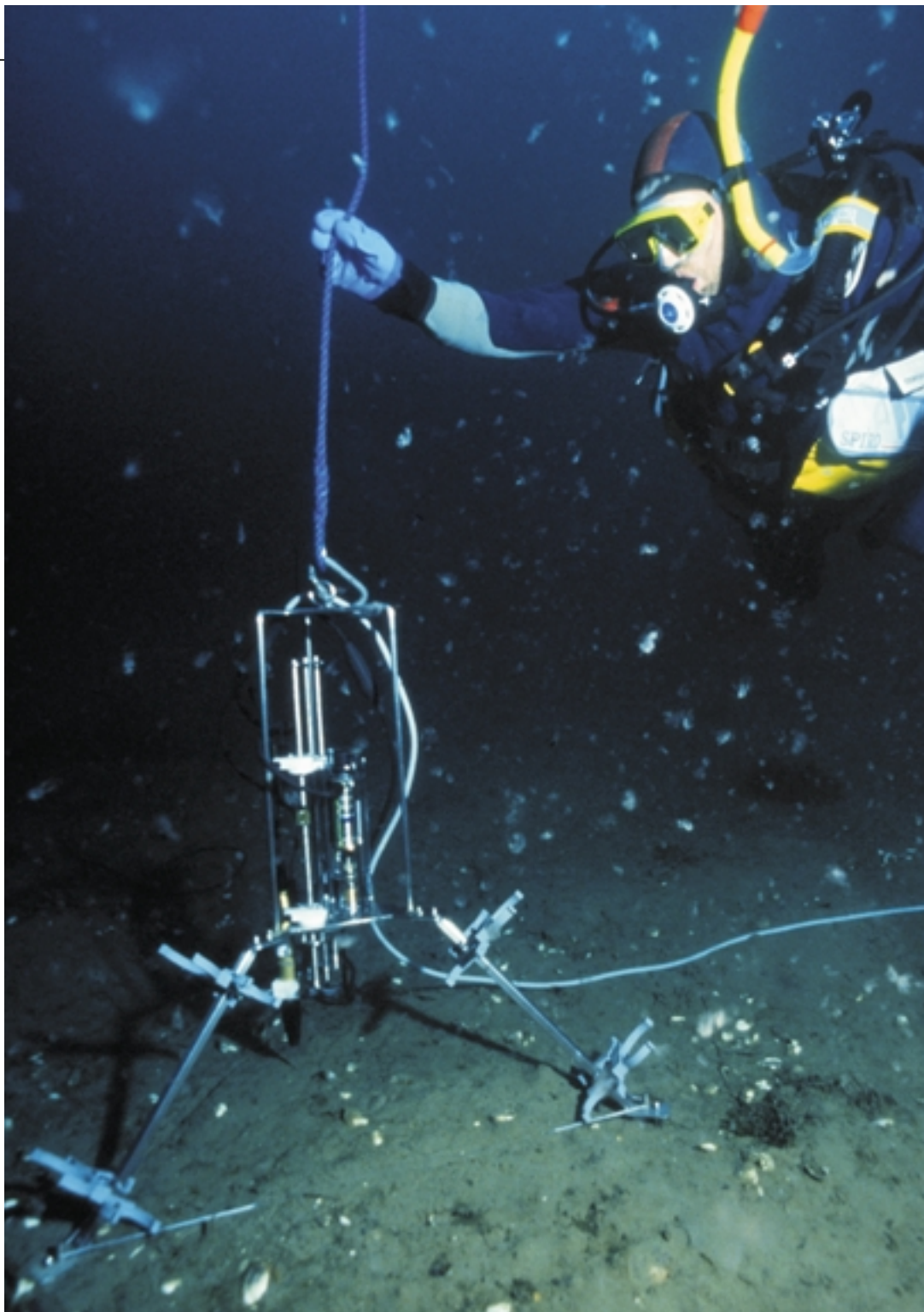
Vand

Overflade



Figur 4

Havbundens ilt kommer kun i direkte kontakt med de færreste af de reducerede forbindelser, der er produceret ved anaerob respiration. Oxidationen af restprodukterne sker gennem en række oxidations- og reduktionsprocesser i havbunden. Svovlbrinte, der er et produkt af sulfatrespirationen, bliver oxideret af oxideret jern (jernhydroxid). Derved gendannes sulfat, og der dannes samtidig reduceret jern, der binder sig til svovlbrinte og danner jernsulfid. De reducerede jernforbindelser kan oxideres med oxideret mangan (manganoxid), der dermed bliver reduceret. Og i sidste ende er det så ilt, der oxiderer det reducerede mangan og gendanner manganoxid.



Dykker placerer et treben med mikroelektroder på havbunden. En lille computer styrer elektroderne og lagrer data.

En vigtig zone

Selv om ilten kun når få mm ned i havbunden, udgør den tynde iltede zone en vigtig grænse mellem den iltfrie havbund og vandsøjlen over havbunden. Forsvinder den, får det afgørende konsekvenser for livet både i havbunden og i vandet ovenover.

Man kan måle nedtrængningen af ilt i havbunden med meget tynde iltelektroder. Spidsen af elektroderne er kun 10-50 mikrometer i diameter. Det er mindre end diameteren af et hår.

Den mørke kurve på figuren nederst i denne boks viser en typisk fordeling af ilt i en dansk havbund. Iltforholdene er her målt med en mikroelektrode i de nederste mm af bundvandet og de øverste mm af havbunden fra Randers Fjord. Fra det iltholdige bundvand trænger ilten ned i havbunden. Her bliver ilten hurtigt brugt, og allerede i 0,8 millimeters dybde er alt ilt væk. Man kan bruge iltprofilet til at bestemme iltforbruget i hver enkelt dybde. Det gør man ved beregninger baseret på iltprofilets krumning.

Når mikroskopiske alger på havoverfladen laver fotosyntese, ændrer det dramatisk på iltforholdene i de allerøverste lag af havbunden (den grønne kurve). Koncentrationen af ilt i havbunden kan blive mange gange højere end i det overliggende vand, og så sker der en betydelig transport af ilt,

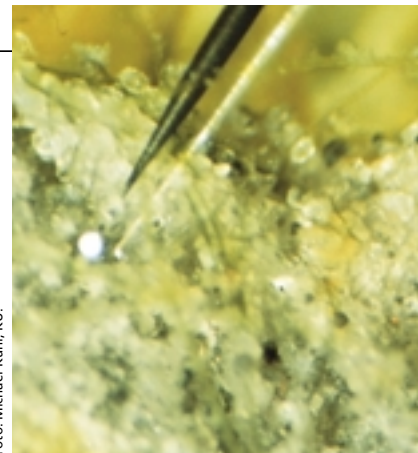
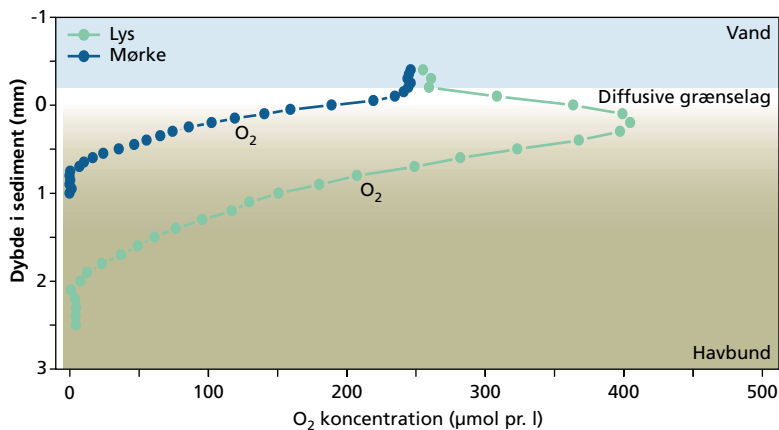
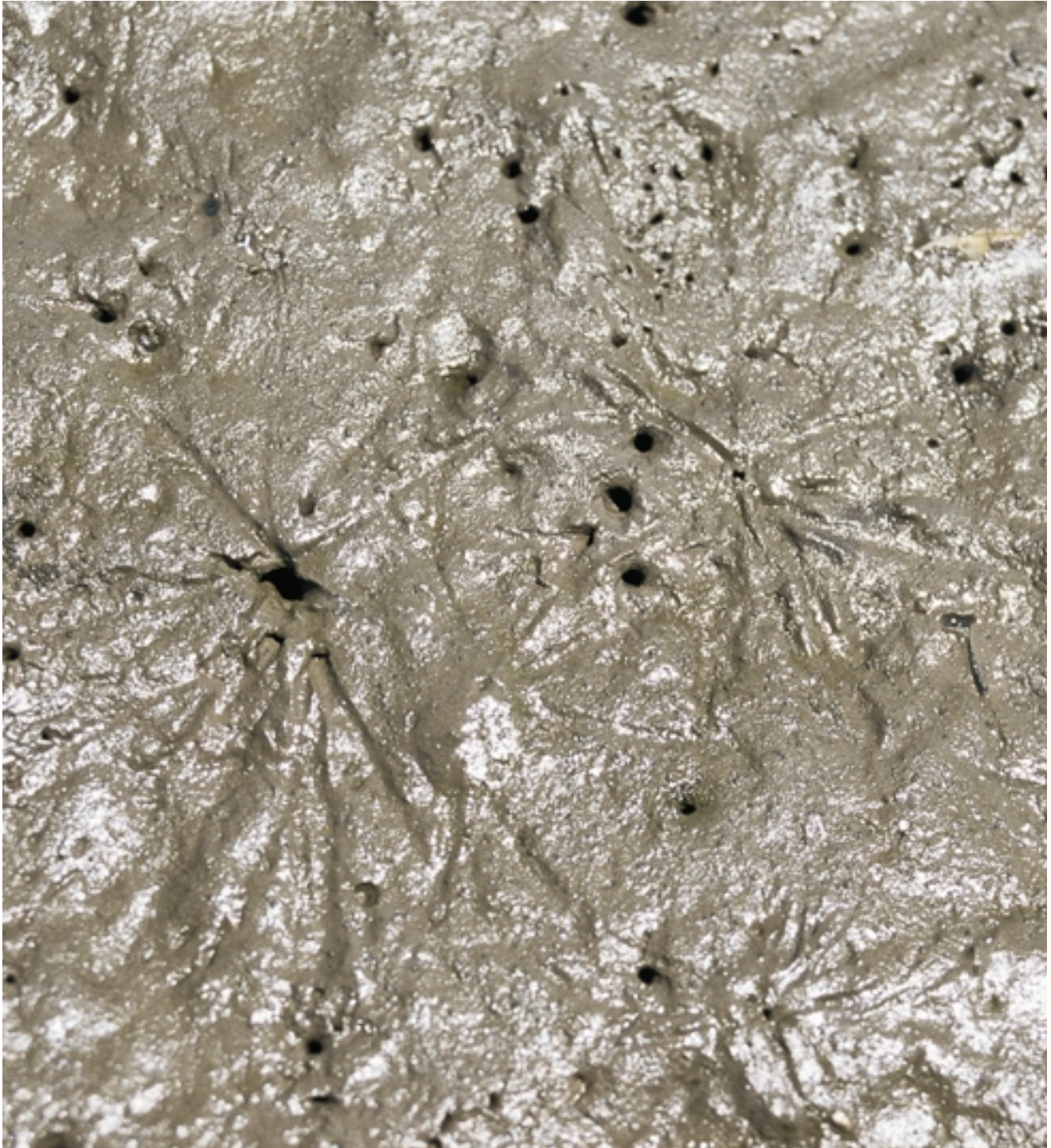


Foto: Michael Kühl, KU.

Foto af en mikroiltelektrode og en mikrolyselektrode blandt sandkorn i havbunden.

dels ud af havbunden, dels dybere ned i havbunden. Det betyder bl.a., at der kan ske en respiration med ilt til større dybder, og at ilt kan oxidere restprodukter dybere i havbunden.

Lige over havbunden findes der en tynd film på nogle få tiendedele mm i tykkelse. Laget kaldes for det diffusive grænselag, og ses tydeligt på iltmålingerne, idet koncentrationen af ilt aftager lineært gennem dette lag. Hældningen af iltprofilet i grænselaget er et mål for det samlede iltforbrug i havbunden.



Jern – en vigtig krumtap

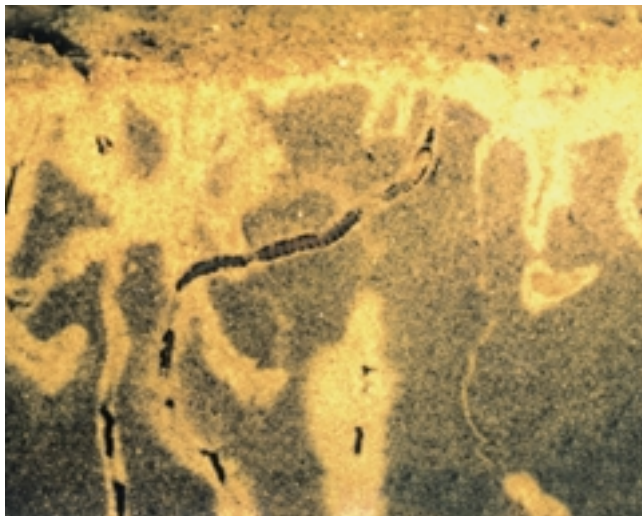
I havbunden er sulfatrespirationen den dominerende anaerobe respirationsproces. Processen producerer svovlbrinte, der på et eller andet tidspunkt skal oxideres, og en meget stor del af havbundens iltoptagelse går netop til at oxidere svovlbrinte. Som vi lige har set, er det imidlertid sjældent, at svovlbrinte kommer i direkte kontakt med ilten. Det skyldes havbundens pulje af oxideret jern, der typisk vil reagere med svovlbrinte, inden den når op til den iltholdige zone.

Jern findes normalt på oxideret form (FeOOH) i den øverste del af havbunden. Svovlbrinte, som dannes ved sulfatreduktion i den dybere del af havbunden, trænger op mod overfladen, og inden den giftige svovlbrinte når den iltede zone i havbunden, reagerer den med oxideret jern og bindes i havbunden som ugiftigt jernsulfid (FeS) eller oxideres til frit svovl (S^0) eller sulfat (SO_4^{2-}) (Figur 4). Jernsulfid fælder ud i havbunden og bliver på et senere tidspunkt oxideret med ilt eller manganoxid; derved gendannes sulfat og jern på oxideret form (Figur 4).

Havbundens jernpulje virker på den måde som en bank for oxidationskapacitet. Der kan lånes i banken til oxidation af svovlbrinte, men gælden – den såkaldte iltgæld – skal indfries senere. Og det sker i sidste ende med et forbrug af ilt. Havbundens jernpulje tilbageholder og ophober på den måde midlertidigt store mængder svovlbrinte. Det hindrer umiddelbart et meget stort forbrug af ilt. Og det har stor betydning – bl.a. for udviklingen af iltsvind.

Gennem sommeren og det tidlige efterår, hvor temperaturen er høj, og hvor der kommer meget organisk stof til havbunden, stiger omsætningen ved sulfatreduktion. Det betyder, at der bliver produceret mere og mere svovlbrinte. Samtidig flytter omsætningen med sulfatreduktion opad i havbunden i takt med, at forholdene bliver mere og mere reducerede i løbet af sommeren. Svovlbrinte binder derfor en stadig større mængde af havbundens oxiderede jernforbindelser gennem sommeren, og havbundens brune (oxiderede) zone bliver stadig tyndere (se side 29). Først når svovlbrinte har bundet hele puljen af oxideret jern i den iltfrie del af havbunden, vil svovlbrinte nå helt op til den iltholdige zone af havbunden. Og først på dette tidspunkt vil oxidationen af svovlbrinte medføre et betydeligt iltforbrug pga. den direkte oxidation med ilt.

Havbundens pulje af jern er afgørende for bundens sundhedstilstand. Dyr, der graver og roder i havbunden, spiller en stor rolle i oxideringen af havbundens jernpulje.



Fotos: Erik Kristensen, OU.

Dyr, der graver i havbunden, trækker iltrigt vand langt ned i havbunden. Her kan det bl.a. oxidere de reducerede jernforbindelser. På billedet ses de oxiderede zoner som lyse lag omkring ormerør.

Havbundens jernpulje binder og "neutraliserer" altså mange måneders produktion af svovlbrinte. Havde det oxiderede jern ikke været der, ville produktionen af svovlbrinte med det samme kræve et stort iltforbrug. Evnen til at tilbageholde reducerede forbindelser, specielt svovlbrinte, kalder man for **sedimentets ilttingsreserve** eller **svovlbrinte-bufferkapacitet**. Det beskriver indirekte størrelsen af havbundens oxiderede jernpulje. Og det er den, der bestemmer, hvor meget oxidationskapacitet havbunden "kan låne i banken" – eller hvor stor en iltgæld, den kan opbygge.

I løbet af vinterhalvåret aftager temperaturen og tilførselen af organisk stof til havbunden. Det betyder, at stofomsætningen i havbunden bliver mindre intensiv, og at iltforholdene i havbunden igen bliver bedre. Hård vind og store bølger kan bevirke, at de øverste mm af havbunden hvirvler op i vandsøjlen. Man kalder det for **resuspension**. Når det sker, ilttes det reducerede partikulære jernsulfid (FeS) og det reducerede opløste jern (Fe^{2+}) let. Selv kortvarige ophvirvlinger er i stand til effektivt at oxidere reducerede jernforbindelser i overfladelaget. Og først på dette tidspunkt af året indfries altså en betydelig del af den iltgæld, der blev skabt gennem sommeren.

Populært kan man sige, at havbundens oxiderede jernpulje lægger sig som et "**jerntæppe**" oven på den reducerede del af havbunden. Jerntæppet "sluger" i første omgang det iltforbrug, som oxidationen af svovlbrinte kræver og

udskyder dermed det reelle iltforbrug til efteråret og vinteren ved at tilbageholde den producerede svovlbrinte. Først når de oxiderede jernpuljer er opbrugt, bliver jerntæppet hullet, og først da kan der ske et udslip af svovlbrinte til vandet under et betydeligt iltforbrug.

Vi kan måle havbundens ilttingsreserve og anvender det som et udtryk for, hvor lang tid havbunden kan udskyde tidspunktet for det faktiske iltforbrug (se side 55). Slipper reserven op, står man i akut fare for udslip af svovlbrinte og dermed risiko for iltvind i bundvandet.

Dyr, der graver i havbunden, spiller gennem hele året en vigtig rolle ved at oxidere jernpuljen. Mens de graver, og når de lever i deres rør og huler i havbunden, blander de iltet vand dybere ned i havbunden og bringer reducerede forbindelser op til overfladen. En havbund rig på bunddyr har derfor mulighed for at have en god oxideret jernpulje og dermed en god ilttingsreserve.

Da havbundens jernpulje udskyder det reelle iltforbrug, kan det være et problem at bruge havbundens iltoptagelse som et mål for havbundens samlede stofomsætning. Alle respirationsprocesser – såvel den aerobe respiration som de anaerobe processer – har imidlertid kuldioxid som slutprodukt, og det er derfor mere korrekt at udtrykke havbundens samlede stofomsætning som den samlede produktion af CO_2 . Det er desværre betydeligt vanskeligere at måle frigivelsen af kuldioxid fra havbunden end at måle havbundens iltoptagelse.

Havbunden tager farve efter indholdet af jernforbindelser

Den allerøverste del af havbunden, hvor ilt når ned, kalder man for den **oxiske zone**. Der er ikke ilt i resten af havbunden. Den del kalder man samlet for den **anoxiske zone**.

Den anoxiske zone deles ind i to zoner. Lige under den oxiske zone findes jern og mangan stadig på oxideret form: Jernhydroxid – Fe(III)OOH og manganoxid – Mn(IV)O₂. Dette lag kaldes den **suboxiske zone**.

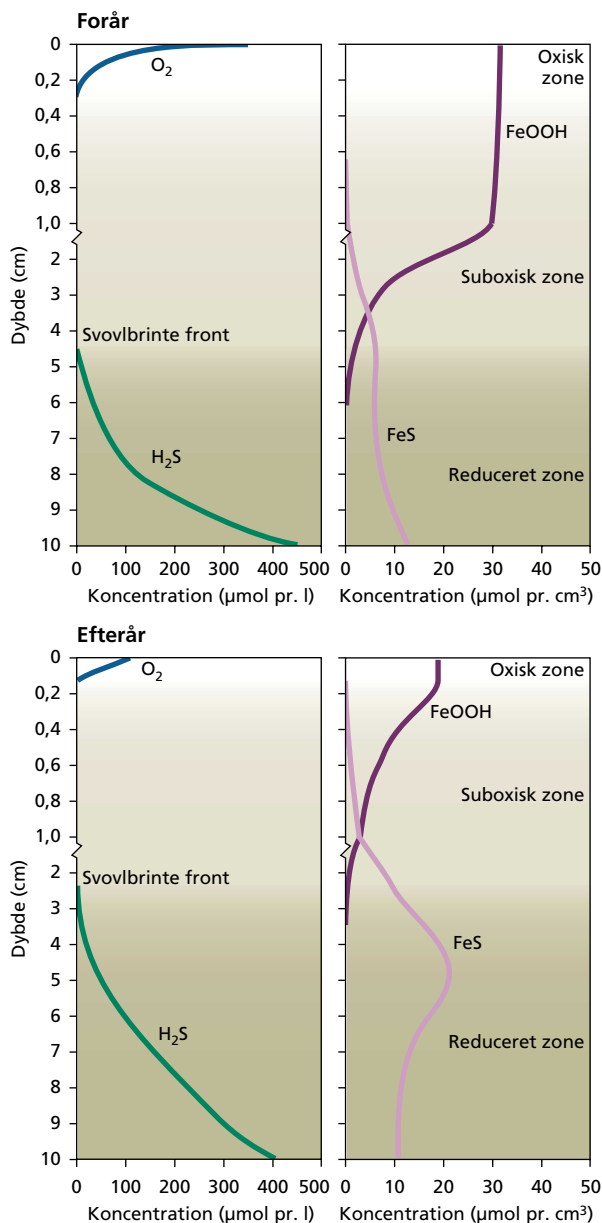
Den suboxiske zone og den oxiske zone udgør tilsammen den **oxiderede del** af havbunden. Oxiderede forhold i havbunden betyder simpelthen, at det såkaldte redoxpotentiale er positivt. Redoxpotentialet er bestemt af summen af oxiderende og reducerende stoffer. Selvom redoxforholdene er positive i den oxiderede del, er der altså kun ilt i den øvre oxiske zone. Under det oxiderede lag er redoxpotentialet negativt, bl.a. pga. frit svovlbrinte. Denne del af havbunden kalder vi for det **reducerede lag**.

Jernhydroxid farver havbunden brunlig, og tager man en prøve af havbunden op, kan man let se udbredelsen af det oxiderede lag. Det er i denne zone, at organisk stof bl.a. bliver oxideret med jern (jernreduktion).

Længere nede i havbunden binder svovlbrinte (H₂S) sig til jern og danner jernsulfid (FeS), der farver sedimentet sort. Den reducerede del af havbunden starter ved det sorte lag. Ofte kan man se grænsen med det blotte øje. Men man kan mere præcist fastlægge den ved at stikke en sølvtråd ned i havbunden. Svovlbrinten vil på kort tid gå i forbindelse med sølvet og danne sølvsulfid, der farver sølvtråden sort. Det er det samme, der sker, når man spiser et blødkogt æg med en sølvske, da æggeblommen har et stort indhold af svovlforbindelser. Er svovlbrinte i overskud, lugter havbunden kraftigt af rådne æg.

Dybt nede i havbunden bliver FeS omdannet til pyrit (FeS₂) ved reaktion med frit svovl (S⁰) eller svovlbrinte (H₂S). Pyrit er næsten farveløst, og havbunden bliver derfor grå.

Svovlbrintefronten – og dermed den sorte del af havbunden – bevæger sig langsomt op mod havbundens overflade i løbet af sommeren. Om vinteren, hvor iltforholdene i bundvandet er bedre, vil bølger og vind hvirvle den øverste del af havbunden op i vandet; der sker en resuspension af havbunden. Det oxiderer jernforbindelserne og de sorte, reducerede lag trænger atter dybere ned i bunden.



Bemærk at dybdeangivelsen ændrer sig ved 1 cm's dybde.



Liglagen og bundvending

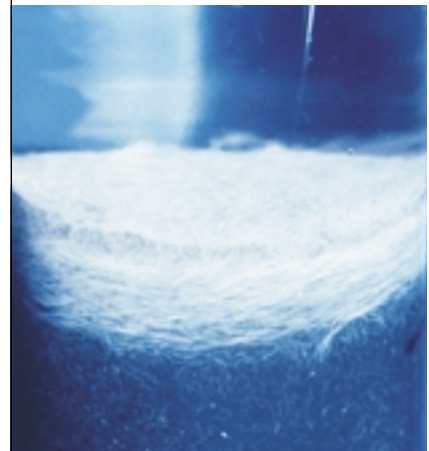
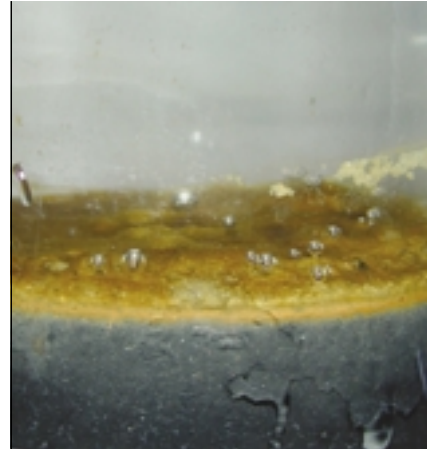
Gennem de seneste ti år har man flere og flere steder set det såkaldte "liglagen" på havbunden af danske kystvande. Det er hvide svovlbakterier, ofte Beggiatoa, der danner tætte måtter på overfladen af bunden.

Når der ligger et liglagen på havbunden, er havbundens iltningsreserve helt opbrugt, og hele havbunden er reduceret. Sedimentet er kulsort, og svovlbrinte når helt op til overfladen af havbunden. De hvide svovlbakterier udgør den allersidste skanse mod udslip af svovlbrinte. Bakterierne får energi ved at oxidere svovlbrinte, der trænger op til overfladen af havbunden. De er altså kemo-litotrofe (se side 11). Til oxidationen af svovlbrinte bruger de ofte den sparsomme ilt, der er i bundvandet.

Et liglagen på havbundens overflade er et tegn på en meget kritisk balance. I sådan en situation er der lige netop ilt nok i bundvandet, til at svovlbakterierne kan oxidere det svovlbrinte, der når op til overfladen af havbunden. Bliver tilførslen af ilt til bundvandet mindre, vil balancen forskybe sig, og en del af svovlbrinten kan derved slippe ud i vandet. Svovlbrinte er giftigt for organismer, der respirerer med ilt. Et udslip af svovlbrinte har derfor katastrofale følger for dyr, der lever i og på havbunden og oppe i vandsøjlen.

Bliver svovlbrinte frigivet til vandsøjlen, flytter selve iltforbruget op i vandet. Svovlbrinte oxideres hurtigt kemisk i vandsøjlen og fjerner derved hurtigt alt ilt fra bundvandet. Der bliver dannet frit svovl, der farver vandet mælkehvidt.

Liglagen er en belægning af svovlbakterier på havbunden. Bakterierne er sidste skanse mod et udslip af svovlbrinte fra bunden til vandet ovenover.



Fotos: Peter Bondo Christensen, DMU.

Det øverste billede viser et tværsnit af en havbund under gode iltforhold. Det nederste billede viser en bund under dårlige iltforhold, hvor havbunden er reduceret, og hvor et liglagen dækker overfladen. Havbunden er brunlig, når der er mange iltede jernforbindelser. Når iltningsevnen er brugt op, trænger svovlbrintefronten helt op til overfladen. Havbunden bliver da kulsort, og svovlbakterier kan danne tætte måtter på overfladen. Bakterierne er sidste skanse mod et udslip af svovlbrinte til vandet. De udnytter nemlig svovlbrinte i havbunden og får energi ved at oxidere svovlbrinten med ilt fra vandet.



Foto: Søren Larsen, Fyns Amt.

Kommer svovlbrinte op i vandet, oxideres det til frit svovl, der farver vandet mælkevidt. Billedet er et luftfoto fra Odense Fjord. Under en tæt bevoksning af den store flydende alge, søsalat, var svovlbrintefronten rykket tæt til overfladen af havbunden. Algerne forsvandt pludselig, og så var der fri adgang for svovlbrinte til vandsøjlen. Oxidationen af svovlbrinte til frit svovl i vandet farvede vandet mælkevidt og fjernede med et slag alt ilt fra vandet i området. Iltsvindet var en realitet.

Pludselig fiskedød opstår bl.a., hvis en bundvending trækker svovlbrinte op i vandsøjlen. En bundvending sker inden for få minutter, og fiskene har ingen mulighed for at undslippe. Optakten til bundvendingen strækker sig imidlertid ofte over mange måneder. Havbundens oxiderede forbindelser svinder langsomt ind, mens svovlbrintefronten kravler op mod overfladen. Metanbobler bliver dannet tæt ved overfladen og kan i sidste ende være årsag til en bundvending. Frigives metanboblerne pludseligt til vandet, river de bundmateriale med op i vandet. Svovlbrinte, der er opløst i metanboblerne, slår bundlevende dyr og fisk i vandsøjlen ihjel.

I situationer, hvor den reducerede zone når højt op i havbunden, bliver der dannet metan højt oppe i havbunden. Når metan findes i høje koncentrationer, danner det gasbobler i havbunden. I sådanne tilfælde kan havbunden pludselig frigive store metanbobler, der river store dele af bundmaterialet med op i vandsøjlen. Det er det, man kalder en **bundvending**. Det er altså metanbobler og ikke svovlbrintebobler, man af og til ser stige op fra bunden i bl.a. havnebassiner. Svovlbrinte danner ikke selv gasbobler. Metan er ikke direkte giftigt, men metanboblerne indeholder ofte meget svovlbrinte på gasform. Ved bundvending kan fisk flere meter oppe i vandsøjlen blive dræbt på stedet af den frigivne svovlbrinte.

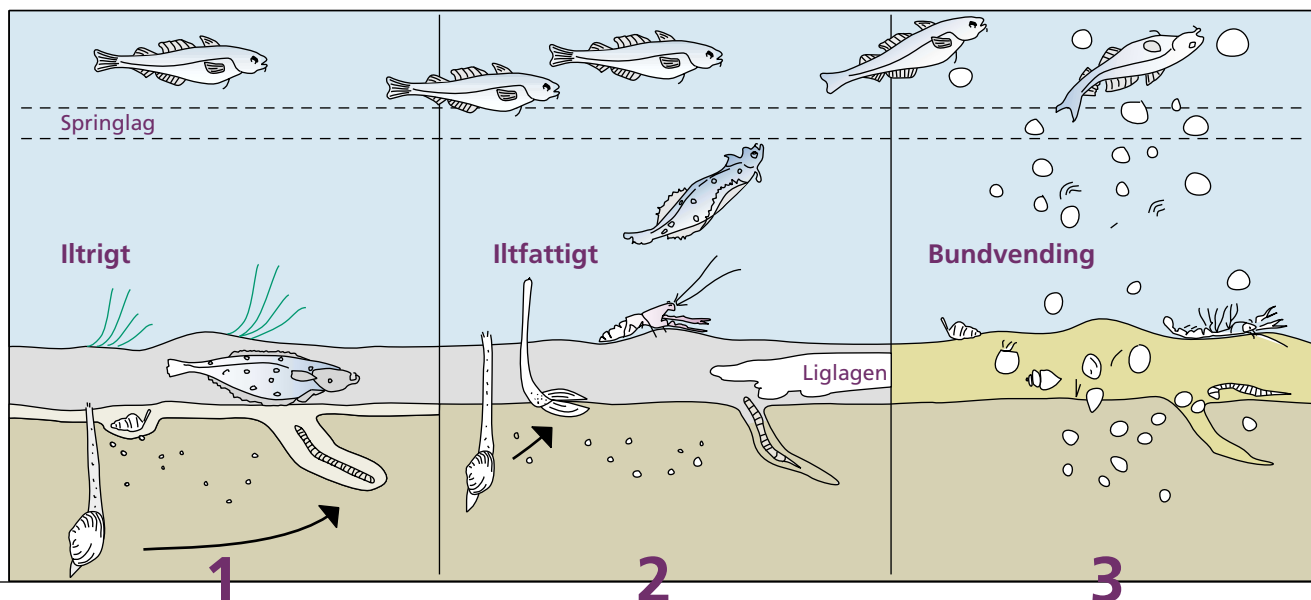
Svovlbrinte er giftigt

I dyr og mennesker binder ilt sig til et jernatom i blodets hæmoglobin og bliver på den måde transporteret rundt i legemet. Når svovlbrinte (H_2S) er tilstede, binder det sig til jernet og optager derved pladsen for det livgivende ilt. Svovlbrinte er derfor dødeligt giftigt for dyr.

Svovlbrinte reagerer også med jern i andre molekyler og enzymer. Særlig fatal er bindingen af svovlbrinte til jernet i enzymet cytokromoxidase. Enzymet er meget vigtigt for respirationsprocessen, der frigiver energi ved cellens stofskifte. Når svovlbrinte blokerer enzymet, bliver der ikke længere frigjort energi, og cellen dør. Svovlbrinte har samme giftige virkning som kulilte (CO) og blåsyre (HCN).

Svovlbrinte lugter af rådne æg selv ved lave koncentrationer. Men lugtesansen bliver hæmmet, specielt hvis koncentrationen bliver høj. Man kan derfor risikere at opholde sig i et miljø med en dræbende koncentration af svovlbrinte uden at opdage det, før det er for sent.

Metan (CH_4) er ikke giftigt i sig selv. Men i særlig høj koncentration fortrænger det luftens ilt og forårsager derved kvælning. Indånder man metan i ukritiske mængder, vil det hurtigt forlade kroppen gennem lungerne – eller for fiskenes vedkommende gennem gællerne – i uændret kemisk form.





Fotos: Hellen Munk Sørensen, Århus Amt og Bent Lauge Madsen, SNS.

Iltsvind

De danske farvande er særligt udsatte for dårlige iltforhold i bundvandet. Fra nord kommer det tunge og salte Nordsøvand ind i Kattegat, og fra syd kommer det ferskere og derved lettere Østersøvand. Østersøvandet lægger sig over Nordsøvandet, og det giver en stærk **lagdeling** af vandsøjlen. Der opstår et springlag i vandsøjlen, der adskiller det lette, varmere overfladevand fra det tungere, koldere bundvand. Et **springlag** er karakteriseret ved, at temperaturen eller saltholdigheden af vandet ændrer sig betydeligt over nogle få meter i vandsøjlen.

I kystvande og fjorde med lav vanddybde er saltholdigheden nogenlunde ens i hele vandsøjlen. Her er det især opvarmningen af overfladevandet, der igangsætter en lagdeling. Solens opvarmning giver overfladevandet en mindre massefylde, og der opstår en lagdeling mod det koldere og derfor tungere bundvand.

En lagdeling, der er opstået pga. temperaturforskelle, er ikke nær så stærk som en lagdeling, der er skabt af forskelle i saltholdighed. Den temperaturskabte lagdeling bliver derfor nemmere nedbrudt ved kraftig vind.

Kommer svovlbrinte op i vandet, forsvinder ilten ofte meget hurtigt. Så hurtigt at fisk ikke kan nå at flygte. Man kan da opleve mængder af opskyllede døde fisk, som vi så det i Mariager Fjord i sommeren 1997.

Hvad er iltsvind ?

Man taler normalt om iltsvind, når iltindholdet i bundvandet falder til kritisk lave værdier. Traditionelt opererer man med grænser på 4 mg ilt pr. liter, som man benævner for **iltsvind** og under 2 mg ilt pr. liter, som kaldes for **alvorligt iltsvind**.

Når iltindholdet kommer under 4 mg ilt pr. liter, påvirkes mange fisk og bunddyr mærkbart, og de forsøger at flygte. Og de fleste dyr kan ikke overleve længere tid ved iltkoncentrationer under 2 mg ilt pr. liter. Grænserne er dog i praksis flydende, da forskellige arter har forskellige tålegrænser for lave iltkoncentrationer. Enkelte arter – eksempelvis nogle muslingearter – kan overleve kortere perioder med totalt iltsvind.

Hvis de iltfrie forhold i bundvandet fører til frigivelse af svovlbrinte fra bunden, forvolder det omfattende og øjeblikkelig massedød af bundlevende dyr og planter samt fisk højere oppe i vandsøjlen.



Foto: Peter Bondo Christensen, DMU.

Hvis en tunge af iltfrit bundvand bliver presset ind på lavt vand, kan det få uventede og pludselige konsekvenser. Her har det ramt en helt tæt ålegræsbevoksning på lavt vand. Efter "besøget" er der stort set kun døde jordstængler tilbage af ålegræsset samt nogle tomme muslingeskaller.

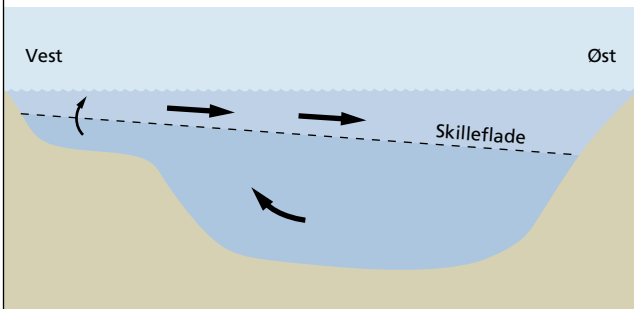
Springlaget virker som et låg, der hindrer, at ilt bliver tilført bundvandet. Gennem en periode med lagdeling bliver der derfor "trukket" på en begrænset og isoleret iltpulje i bundvandet. Når bunddyr og mikrobielle nedbrydere i havbunden har opbrugt al ilten i bundvandet, bliver bundvandet iltfrit. Det er oftest sådanne tilfælde af iltsvind, vi læser om i avisen i sensommeren.

Man kender til beretninger om iltsvind for mange år tilbage. I "udsatte" lagdelte farvande vil der altid kunne optræde perioder med iltmangel i bundvandet. Men gennem de sidste 20 år har vi oftere oplevet iltsvind, og områderne, der er blevet ramt af iltsvind, er blevet stadigt større. En øget tilførsel af kvælstof til havet siden 1960'erne har givet flere planktonalger i de indre danske farvande. Det betyder mere organisk stof, der skal omsættes i havbunden. Resultatet er, at der gennem flere år har været mindre og mindre ilt i Kattegats bundvand i sensommeren. Når iltpuljen i bundvandet af en lagdelt vandsøjle er lille, opstår der nemmere iltsvind.

Det iltfattige bundvand flytter sig pga. vind og strøm. Bevæger bundvandet sig hen over en del af havbunden, der har et stort iltforbrug, kan resten af ilten hurtigt forsvinde ud af vandet.

En tunge af iltfrit bundvand kan volde stor skade i områder, hvor man ikke umiddelbart vil forvente det. Ved vestenvind kan en sådan tunge af iltfrit bundvand fx komme op til overfladen ved fjordens vestlige kyst. Bundvandet erstatter simpelthen det overfladevand, der er blæst væk. Det kan give pludselig fiskedød ved kysten.

Ved kraftig vestenvind blæser overfladevandet væk fra fjordens vestlige kyst. Det kan fx ske i Limfjorden. Skillefladen tipper på tværs af fjorden, og bundvandet erstatter det overfladevand, der er blæst væk. Er bundvandet iltfrit, kan der uventet opstå iltsvind i hele vandsøjlen ved fjordens vestlige kyst.



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.