

Havets levende

- om dyr i en tynd algesuppe

Danske biologer og ingeniører samarbejder om at beskrive de biologiske filterpumper, som findes hos en række havdyr. Forskerne har bl.a. ved hjælp af en ny metode sat præcise tal på blåmuslingens imponerende evne til at pumpe vand.

Over 200 liter i døgnet kan en enkelt stor musling præstere.

Af Carsten R. Kjaer

■ Blåmuslingen er vel nok en af de mest velkendte beboere af havbunden i de danske farvande. De fleste ved, at blåmuslingen lever af at filtrere vandet for mikroskopiske fødepartikler. Men det vil nok komme bag på mange, at en enkelt stor blåmusling på seks-syv cm er i stand til at pumpe mere end 200 liter vand gennem sine filtre i døgnet.

For at kunne sætte præcise tal på blåmuslingens imponerende evne til at pumpe og filtrere vand har forskere gennem tiden anvendt forskellige teknikker. Men det er ikke helt enkelt at udføre sådanne målinger og at beskrive, hvad der foregår i dyrene. At det nu er lykkedes, skyldes et usædvanligt forskningssamarbejde mellem biolog Hans Ulrik Riisgaard fra Syddansk Universitet og ingeniør Poul Scheel Larsen fra Danmarks Tekniske Universitet. Gennem nu mange år har de kigget nærmere på havets "filtratorer" – dvs. dyr, der lever af at si mikroorganismer fra den tynde algesuppe, som havet indeholder.

Nøgleorganismer i økosystemet

Mange dyr lever ligesom blåmuslingen af at filtrere småpartikler fra vandet. Det gør en række andre muslingearter, søpunge,



Foto: Peter B. Christensen

Filtrerende blåmuslinger holder vandet krystalklart. Den enkelte musling filtrerer omkring 5 liter vand i timen.

mosdyr, svampe og børsteorme – og nogle af dem har en lige så høj kapacitet for vandfiltrering som blåmuslingen. Faktisk er disse organismer i mange tilfælde at betragte som "nøgleorganismer" i økosystemet. F.eks. er der i indløbet til Kerteminde Fjord en stor blåmuslingebanke med op til 1000 muslinger pr. kvadratmeter. Forskerne har målt, at disse muslinger filtrerer omkring

200 m³ vand pr. kvadratmeter per døgn. I praksis fungerer muslingerne som et kæmpe "biofilter" i fjordens indløb.

I det lavvandede Kertinge Nor i bunden af Kerteminde Fjord findes en tæt bestand af en anden filtrerende organisme, søpungen *Ciona intestinalis*. Denne bestand kan filtrere et vandvolumen, der svarer til hele vandmassen en gang pr. dag.

Det kan holde vandet næsten krystalklart, såfremt vind og strøm sørger for, at vandmasserne bliver blandet.

Usædvanligt samarbejde

Der er flere gode grunde til, at man som biolog kan kaste sin faglige interesse på havets "filtratorer". Som allerede nævnt kan sådanne organismer have stor betydning for miljøet i de

filtre

kystnære havområder.

I et større økologisk perspektiv er de filtrerende dyr interessante, fordi de udgør et nødvendigt bindeled mellem havets mikroorganismer – dvs. primært planktonalger – og de større dyr højere oppe i fødekæden.

Forskning i filtrerende dyr er imidlertid ikke kun et emne for biologer. Også fra et ingeniørmæssigt synspunkt kan der være noget at hente ved at studere disse så uanseelige skabninger. De filtrerende dyr er nemlig udstyret med naturens egen løsning på, hvordan man designer lavtrykspumper og fine filtre, der skal være effektive uden at stoppe til. Det er også grunden til, at Hans Ulrik Riisgaard i sin tid allierede sig med Poul Scheel Larsen, som har sin daglige gang på sektionen for Fluid Mekanik ved Danmarks Tekniske Universitet. Deres frugtbare samarbejde om at beskrive og forstå de biologiske filterpumper har været med til at placere dansk forskning i den internationale front inden for området.

Lavtrykspumper

Ser man med "strømningstekniske" øjne på et filtrerende dyr, finder man straks en pumpe og et tilhørende pumpesystem, som består af kanaler, filtre, indsnævring osv. Filterpumpen skal sikre, at dyret kan koncentrere en tilstrækkelig stor mængde fødepartikler, der i udgangspunktet er fordelt i et stort vandvolumen. Helt grundlæggende er det således de samme krav, der stilles til de forskellige dyrs filtermekanismer og væskepumper: De skal nemlig kunne fange de samme små partikler effektivt og er derfor tvunget til at pumpe store mængder vand med et

så beskedent forbrug af energi som muligt. Derfor er der også mange funktionelle ligheder mellem de forskellige dyrs filtermekanismer og væskepumper.

Alle filtrerende dyr benytter sig således af lavtrykspumper, hvilket vil sige, at vandet pumpes ved lav hastighed gennem store filtre. I nogle tilfælde består filtrene af et meget tyndt og finmasket slimnet. Men i andre tilfælde sker indfangningen ved hjælp af systemer af fimrehår (cilier), der slår hurtigt frem og tilbage, og som også virker som pumper.

Hos de fleste filtrerende dyr udgør filterpumpen en

meget stor del af dyret – hos søpungen således $\frac{3}{4}$ af hele dyret. Men det er måske ikke så underligt, da der ikke er levnet disse dyr tid til ret meget andet end at filtrere og æde.

Målinger med laser og bordtennisbold

En af de store udfordringer for forskerne har i praksis været at måle, hvor meget vand de forskellige filtrerende organis-

mer pumper. Vandpumpen hos dyrene kan drives af muskellkraft eller ved hjælp af fimrehår (cilier). Blåmuslingen benytter sig af en fimrehårspumpe, og for en sådan er det normale pumpe-tryk kun 1 mm vandsøjle. Det er det tryk, der er nødvendigt for at overkomme modstanden i kanalsystemet, når muslingen typisk pumper ca. 1 ml vand pr. minut. Det maksimale tryk, en blåmusling kan skabe (svarende til "løf-

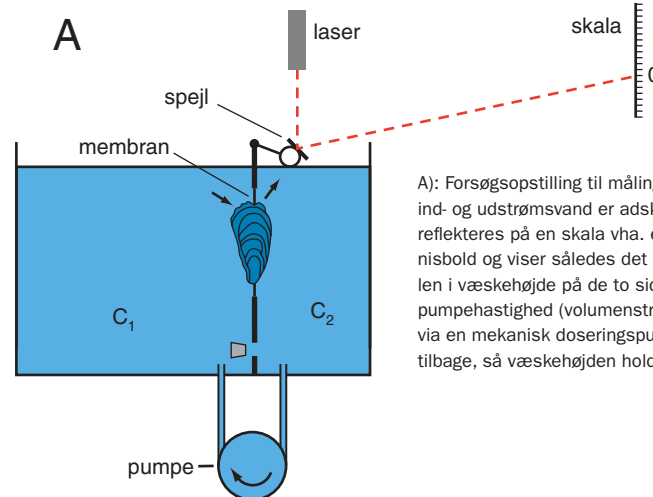
Suspensions-ernæring

Mange dyr har specialiseret sig i at filtrere vandet for fødepartikler, som kan være plankton eller bakterier. Sådanne dyr kaldes under et for suspensionsædere, fordi de lever af partikler, der er suspenderet – dvs. opslemmet – i vandet. De filtrerende dyr kan indfange og omdanne planktonalgerne til animalsk stof, og de er derfor et vigtigt bindeled mellem mikroorganismene og de større dyr højere oppe i fødekæden.

I havets frie vandmasser "græsses" planktonalgerne af zooplankton-organismer, hvoraf de vigtigste er vandlopperne, der bl.a. udgør fødegrundlaget for silde- og makrelfisk.

Nær havbunden, på sten og planter, findes mange bundlevende hvirvelløse dyr, der også lever af at filtrere planktonalger og andre fødepartikler fra vandet – f.eks. en lang række arter af svampe, mosdyr, muslinger, søpunge og børsteorme.

Laser-ping-pong-metoden

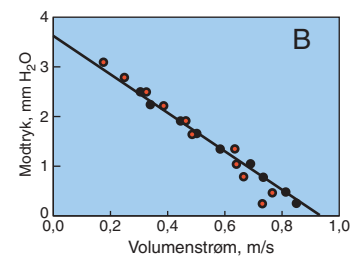


A): Forsøgsopstilling til måling på blåmusling. Muslingens ind- og udstrømsvand er adskilt af en membran. Laserstrålen reflekteres på en skala vha. et spejl på en flydende bordtennisbold og viser således det pålagte modtryk – dvs. forskellen i væskehøjde på de to sider af membranen. Muslingens pumpehastighed (volumenstrøm) ved kendte modtryk måles via en mekanisk doseringspumpe, der løbende pumper vandet tilbage, så væskehøjden holdes konstant.

(B): Af modtrykskurven ses, at det maksimale tryk en blåmusling kan skabe, er 3,6 mm vandsøjle ("muslingepumpens løftehøjde"). Den fundne "modtrykskarakteristik" er grundlaget for den videre ingeniørmæssige analyse af biopumpen, der ikke afviger meget fra en tilsvarende analyse af en menneskeskabt, mekanisk pumpe. Med kendskab til

kanaler, indsnævring, huller og filterdimensioner kan modstanden i pumpen beregnes. Denne "systemmodstand" er lig med pumpeeffekten (overført til vandet) beregnes derefter som pumpe-tryk \times pumpehastighed.

Eksempel: En 35 mm blåmusling pumper 3,6 liter vand i timen med et pumpe-tryk på 1 mm vandsøjle, hvilket resulterer



i en pumpeeffekt på 10 mikrowatt, eller 1,1 % af muslingens samlede stofskifte på 900 mikrowatt.



Foto: Henning Friis Andersen

Filtrerende søpunge (*Ciona intestinalis*) på bunden af Kertinge Nor. Bemærk det meget klare vand.

tehøjen" på en menneskeskabt pumpe, når strømmingen er blokeret), er kun 3,6 mm vandsojle. Det afspejler, at filterpumperne er udviklet til at flytte vand og ikke til at løfte det.

De små tryk har imidlertid betydet, at man i mange år ikke har kunnet lave direkte målinger og analyser af pumpehastigheden hos muslinger. Men forskerne har imidlertid i samarbejde med

bl.a. professor C. Barker Jørgensen ved August Krogh Institutet udviklet en metode, som ved hjælp af bl.a. en laser og en bordtennisbold med et påmonteret spejl kan lave meget præcise

målinger af pumpehastigheden for en musling (se boks).

Ved at videreudvikle og raffinere forsøgsopstillingen har forskerne i de senere år også analyseret filterpumperne hos svampe, søpunge og børsteorme.

Filterpumpernes dimensionering

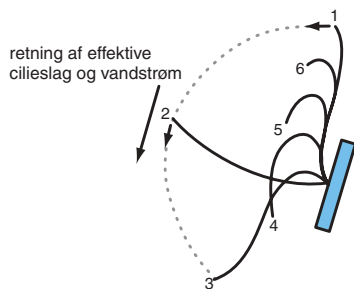
På baggrund af forskernes unikke målemetode har de kunnet klarlægge en række egenskaber ved de filtrerende dyrs filterpumper. Det har længe været diskuteret, om det var marginal levevej at være filtrerende organisme pga. af det tilsyneladende store arbejde med at filtrere det omgivende vand. Men det har nu vist sig, at de filtrerende dyr bruger meget lidt energi på pumpearbejdet til trods for, at pumpen under normale forhold kører 24 timer i døgnet. Blåmuslingen bruger eksempelvis kun ca. 1% af stofskiftet til pumpearbejde. Til gengæld bruger den ca. 20% af stofskiftet på at vedligeholde sin filterpumpe, som består af to W-formede gæller. Derfor kan blåmuslingen ikke spare megen energi ved i perioder at standse pumpen eller regulere den. Det forklarer, hvorfor filterpumperne er dimensioneret mindst muligt og til at fungere ved konstant filtrering.

Det er i øvrigt karakteristisk for dyr, der ernærer sig ved filtrering, at denne evne er en sekundær tilpasning, der har fundet sted i evolutionens løb. For blåmuslingens vedkommende vil det sige, at dens to W-formede gæller, der oprindeligt er udviklet til respiration, med tiden er trådt i ernærings tjeneste. Gællerne er således blevet mange gange større end nødvendigt for at dække optagelsen af ilt og udskillelsen af kuldioxid. Faktisk er gennemstrømningen af vand blevet så kraftig, at gællen som åndedrætsorgan er blevet overflødig, idet der foregår en tilstrækkelig udveksling af ilt og kuldioxid over dyrets øvrige ydre overflader til at dække behovet.

Anvendelig viden

Det at vide, hvor meget vand muslinger eller andre bundlevende filtrerende organismer

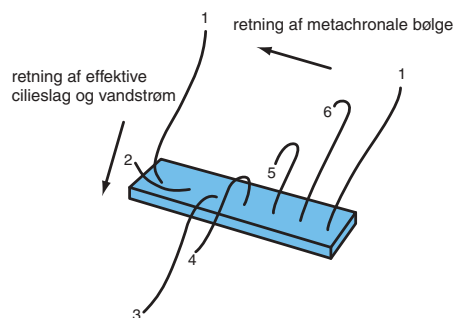
Cilie-pumpe



Mange dyr pumper vand ved hjælp af bånd af cilier (fimrehår), som viser karakteristiske slagmønstre. Tegningerne illustrerer dels en enkelt cilies slag (til venstre) og dels den tidsmæssige faseforskydning af slaget langs et ciliebånd (nederst). I virkeligheden er der mange flere cilier stående tæt sammen i båndet. Byggestenen (grundelementet) er den enkelte cilie, hvis periodiske frem- og tilbagegående bevægelse består af et aktivt slag med udstrakt cilie, der driver den

omliggende væske frem, og et returslag, hvor cilien smyer sig tilbage til udgangspositionen.

Hos mange havdyr, som anvender cilier, står disse meget tæt og i flere rækker, så der dannes et langt bånd, som eksempelvis båndene af cilier langs bryozoernes tentakler. Strømningsmæssigt påvirker disse tætstående cilier hinanden til næsten at slå i fase (men ikke synkront), hvilket i mikroskop ligner en bølge, som løber på tværs af retningen af det aktive



slag og dermed retningen af det strømmende vand.

På figuren ses, hvorledes det aktive slag forløber i fase 1-3, mens det langsommere returslag foregår i fase 3-1. Det aktive slag udgør kun ca. 1/5 af hele cyklus, som gennemføres omkring 25 gange i sekundet (slagfrekvens = 25 Hz). Den viste afstand mellem cilierne på figuren til højre er stærkt overdreven, idet den fri afstand mellem de 0,2 µm tykke cilier i en række kun er 0,05 µm.

pumper, har flere praktiske anvendelser. F.eks. kan man lave skøn over omsætningen af primær føde (hovedsagelig planktonalger) i et givet kystnært område eller over potentialet for "oprensning" af algevækst, såfremt et vandområde er godt opblandet. Når man dimensionerer akvakulturanlæg til muslingeopdræt, må dette også tage udgangspunkt i muslingernes pumperater og fødebehov.

Endvidere har kendskabet til pumperater for muslinger haft betydning for skøn over forureningen med tungmetaller i havet. Det er velkendt, at blåmuslinger har en tilbøjelighed til at ophobe mange miljøfremmede stoffer. Det hænger sammen med, at dyret pga. af sin filtrerende levevis transporterer betydelige vandmængder gennem gællerne, hvor de opløste miljøfremmede stoffer kan optages på overfladen. Hvis man analyserer en musling for optaget af f.eks. kviksølv, cadmium eller bly, kan man ud fra dens alder – og dermed det samlede vandvolumen, den har pumpet i sin levetid – lave et skøn over middelmængden af tungmetallet i det vand, den har været omgivet af.

Blåmuslingen har i de sidste 20-30 år vundet international status som universel "forureningsindikator" i de kystnære farvande og er i dag den hyppigst anvendte indikatororganisme i det marine miljø. Da Hans Ulrik Riisgaard i sin tid var ansat på Miljøstyrelsens Havforureningslaboratorium, benyttede han således blåmuslinger til at afsløre den omfattende kviksølvforurening omkring Harboøre Tange og til at lokalisere kviksølvudslippet fra Cheminovas giftdepot ved hofde 42 i februar 1981.

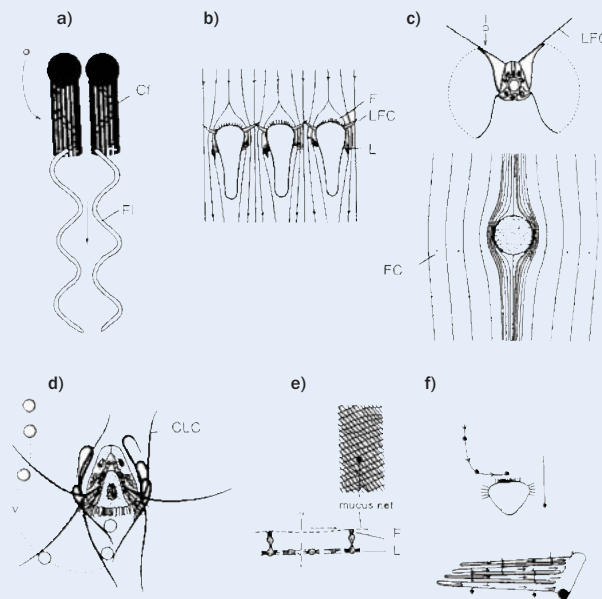
Fra et ingeniørmæssigt synspunkt er det fristende at spekulere på, om vi kan eftergøre muslingens kunststykke i en teknisk konstruktion til filtrering af vand for urenheder. Men selv med respekt for nutidens mikro-mekaniske aktuatorer er det forskernes skøn, at naturen på dette punkt stadig er os overlegen. ■



Filtrerende børsteorm (*Euchone papillosa*) med tentakel-kronen slået ud.

Foto: Hans Ulrik Riisgaard

Fangstmekanismer hos filtrerende dyr med cilier



- (a) »krave-si« hos svampe: lange parallelle cilier (flageller) fungerer som en peristaltikpumpe, som trækker vandet ind mellem en krave af mikrovilli, der fungerer som en si.
- (b) tværsnit af »gællefilter« hos musling: cilier på siderne af gællefilamenterne pumper vandet nedad, mens sammensatte cilier slår i den modsatte retning og fører partiklerne fra vandet og op på filamenternes forside.
- (c) tværsnit af tentakel på mosdyr: cilier på siderne pumper vandet nedad gennem et filter af stive cilier; på den nederste figur ses en 6 mikrometer planktonalge holdt tilbage på filteret.
- (d) »nedstrømsfangst« hos en børsteorm: sammensatte cilier pumper vandet med partikler nedad samtidig med at partiklerne indhentes og føres ned på et ciliebånd, som fører de fangede partikler væk.
- (e) partikelfangst på slimnet hos søpung: cilier pumper vandet nedad gennem nettet, som kontinuerligt fører de tilbageholdte partikler til højre, hvor nettet rulles sammen og føres ned til munden.
- (f) »opstrømsfangst« hos brachiopoder (armfodder), hvor fangstmekanismen stadig er ukendt.

Om forfatteren
Carsten R. Kjaer,
Aktuel Naturvidenskab
Tlf.: 8942 5555
red@aktuelnat.au.dk



Om forskerne
Hans Ulrik Riisgaard er
Dr. scient. og lektor ved
Marinbiologisk forskningscenter,
Syddansk Universitet
Hindsholmsvej 11
5300 Kerteminde
E-mail: hur@biology.sdu.dk



Poul Scheel Larsen
er professor ved
Institut for Mekanik, Energi
og Konstruktion
DTU, bygning 101 E
2800 Kgs. Lyngby
E-mail: psl@mek.dtu.dk

Videre læsning

Riisgaard, H.U. & P.S. Larsen (2003) *Suspensionsernæring - om filtrerende dyrs liv i en tynd algesuppe*. *Tidsskrift for miljø og natur Vand & Jord* 1: 4-7

Riisgaard, H. U., P. S. Larsen & C. Nielsen (2002). *Filtrerende bryozoaer – partikler og strømmende vand*. *Naturens Verden* 5: 12-23.