

Hvad sker, hvis vi slukker for ilten?

Iltning af bundvandet og mindre spildevand har givet renere vandmiljø i Furesø og Hald Sø. Men hvor meget skyldes iltning, og hvor meget kommer fra mindre spildevand? Det spørgsmål kan belyses med en massebalance model.

BENJAMIN NIELSEN

Furesø og Hald Sø er blevet iltet siden 2002 og 1985. Tidligere udledning af spildevand blev ført uden om søerne, dambrug blev lukket og møddingvand fra landbrug stoppet. Fra lagertanke med flydende ilt på land pumpes ilten gennem slanger til diffusorer placeret de dybeste steder i søerne. Fra diffusorerne frigives ilten som bittesmå bobler, der opløses i vandet, før de når op til springlaget. På den måde bevares lagdelingen af vandet med køligt bundvand, springlag og varmere overfladevand, og man undgår at få transporteret næringsstoffer fra bundvandet op til overfladevandet, hvor det kan give øget vækst af alger. Der iltes kun om sommeren fra juli til oktober. Tilførslen af ilt tilpasses til at holde iltniveauet i bundvandet mellem 4 og 6 milligram pr. liter.

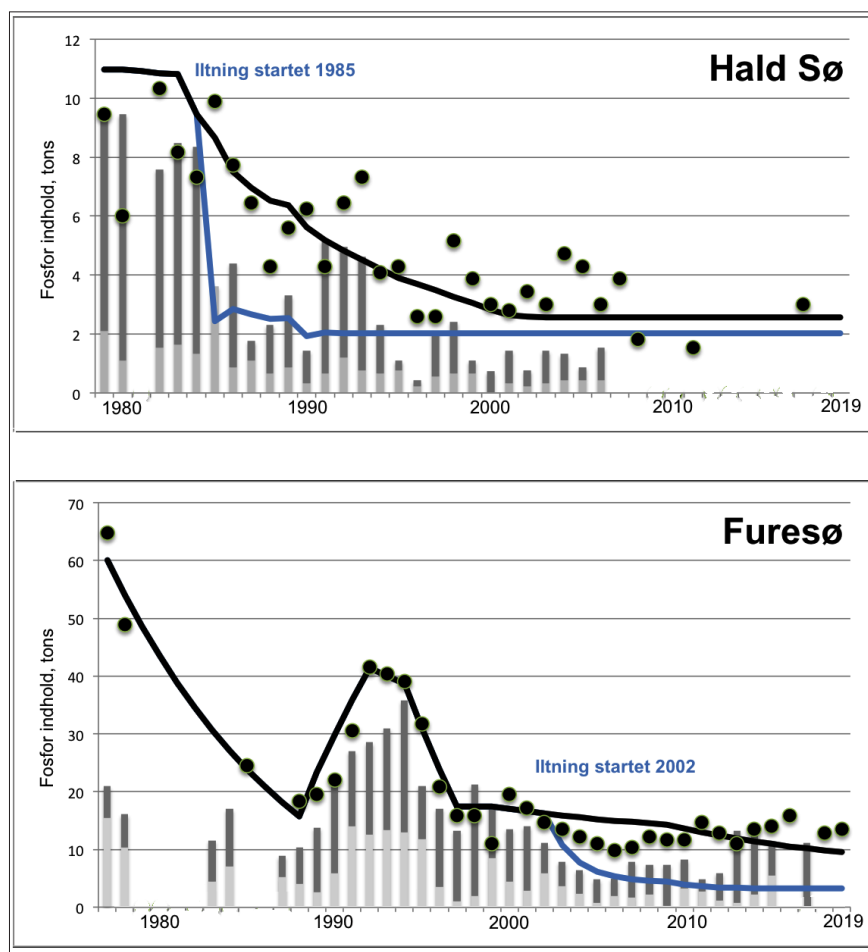
Ilt kontrollerer fosfor

Formålet med at ilte bundvandet er at hindre frigivelse af fosfor fra sedimentet. Meget af den fosfor, det tidligere blev tilført med spildevand, ligger i sedimentet, bundet til jern, og frigives hver sommer, når ilten forsvinder fra bundvandet. Målinger i laboratorium og i søer viser, at fosfor bindes i sedimentet, når vandet er iltholdigt, og opløses, når ilten forsvinder. Det forhold, at der sker en samtidig opløsning af ferrojern og fosfat tages som bevis for, at fosfat er bundet til ferri-jern under iltede forhold. Konceptet "Ilt kontrollerer frigivelsen af fosfor fra sedimenter" er velkendt inden for ferskvandsbiologi, og beskrevet i generationer af lærebøger, siden det blev fremsat i 1936 af Einsele /1/ og 1941 af Mortimer /2/. Foruden at holde fosfor i sedimentet har iltningen også til formål at skabe gode leveforhold for fisk og bunddyr.

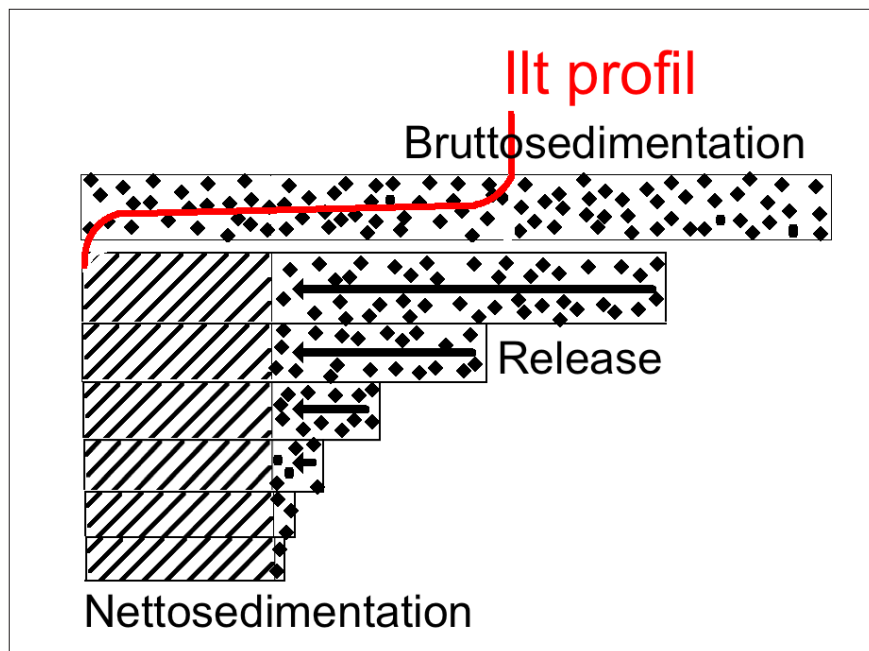
Slukker vi for ilten, har vi balladen

Forbedringen af vandmiljøet i Hald Sø er sket gradvist over de tredive år, den er blevet iltet. Søen har ændret tilstand fra tidligere eutrof med sigtdybde 2 meter til nu mesotrof med sigtdybde 4-5 meter. Frigivelsen af fosfor fra sedimentet, den interne pulje, er blevet mindre med årene. Et enkelt år, 2006, blev ikke

iltet. Det år afgav sedimentet mere fosfor. Derfor besluttede man at fortsætte iltningen for ikke at risikere at sætte 30 års forbedring over styr. Som Jens Peter Müller, Fiskeriøkologisk Laboratorium, har formuleret det: "Slukker vi for ilten, har vi balladen". Underforstået at så vil sedimentet afgive den fosfor, der er opmagasineret i årene med iltning, og søen vil



Figur 1. Opløst fosfor tidlig forår i Hald Sø og Furesø. Sorte punkter er målte værdier. Blå kurve er beregnet fosforpulje ved antagelse af, at iltning holder fosfor i sedimentet (Scenarie 1). Sorte kurve er beregnet fosforpulje ved antagelse af, at iltning ingen effekt har på sedimentets evne til at holde på fosfor (Scenarie 2). Lysegrå søjler er opløst fosfor under springlaget tidlig forår. Mørkegrå søjler er frigivelse af fosfor i løbet af sommeren (intern pulje). Data stammer fra miljøportalens STOQ database



Figur 2. Iltprofil målt med mikroelektrode ned gennem årlige sedimentlag. Principskitse efter Gächter /5/.

falde tilbage til fordums næringsrige tilstand. Knud Rasmussen konkluderede i sin rapport om Hald Sø, at iltningen har fremskyndet søens udvikling mod renvandet tilstand med tredive år /3/.

Helt så klar konklusion kommer Ole Geertz-Hansen ikke frem til i rapporten om iltning af Furesø 2003-2017 /4/. Her havde iltningen ingen tydelig eller hurtig effekt. Søens

*fosforkoncentration faldt ganske vist til under det halve af niveauet før spildevandsreduktionen, og sigtddybden blev fordoblet fra 2 til 4 meter. Men det skete allerede før, iltningen blev startet, og mens iltningen har været i gang, har fosforbeholdningen ikke ændret sig ret meget. Konklusionen i furesørapporten er, at iltningen ingen tydelig effekt har haft, og at det ikke er muligt at se en klar udviklings-

trends. Samt at det er værd at overveje at stoppe iltningen. Eventuelt for en sikkerheds skyld forsøge med en "blød overgang", hvor man stopper iltningen, men lader anlægget stå, så det kan startes igen, hvis søen falder tilbage til næringsrig tilstand. Furesøen er svær at forudsige. Det er vanskeligt at opstille en kompleks model til at beregne effekten af iltning eller ophør af iltning, da erfaringerne med denne type indgreb er meget begrænset.

I Furesørapporten henvises til en artikel om iltning af to dybe søer i Schweiz, hvor forskeren, René Gächter, anvender en massebalanceligning til at regne på effekten af iltning af disse to søer /5/.

Massebalance ligningen

Ændringer i søens fosforbeholdning kan beregnes med massebalanceligningen (1):

$$V * \Delta P = I + R - S - O \text{ (ton pr. år)} \quad (1)$$

V er søens vand volumen. P er koncentrationen af opløst fosfor (ortofosfat) tidlig forår efter vinter cirkulation. ΔP er ændringen fra et år til næste år. I er input (ekstern tilførsel). R er release eller frigivelse fra sedimentet (intern pulje). S er bruttosedimentation. O er output gennem afløb fra søen.

Output via søens afløb, O, kan beregnes fra fosforkoncentration og opholdstid (T) eller vandskifte ($f = 1/T$) (2):

$$O = 1/T * P * V \text{ (ton)} \quad (2)$$

Bruttosedimentation S kan bestemmes som ændringen i totalfosfor i epilimnion fra forår til efterår, hvor søen er lagdelt (3):

$$S = TP \text{ forår} - TP \text{ efterår} + I - O \text{ (ton)} \quad (3)$$

Nettosedimentation (S - R) kan bestemmes fra fosforbalancen (4):

$$(S - R) = - \Delta P * V + I - O \text{ (ton)} \quad (4)$$

Nettosedimentation er sedimentets evne til at binde fosfor permanent. Bindingskapaciteten afhænger ikke kun af iltforholdene i vandet over sedimentet, men også af oplandets geologi i form af mineraler, der tilføres søen, og som kan adsorbere og udfælde fosfor i de dybere, iltfrie lag af sedimentet. Jern, aluminium og kalk har betydning her, foruden sedimenteret organisk stof. Enhver sø har en vis maksimal kapacitet til at tilbageholde fosfor. Er bruttosedimentationen større end den maksimale kapacitet, bliver overskydende fosfor frigjort til bundvandet som intern pulje.

Beregning af scenarier

Vi kan betragte iltningen af søerne som fuld-

Tabel 1. Karakteristika for søerne.

		Hald Sø		Furesø	
Hovedbassin	ha		300		739
Max. dybde	m		31		37,7
Volumen	mio. kbm.		43		122
Opholdstid	år		1,5		12
Input	t/år	1979	5,8	1978	3,0
		1984	4,5	1990	2,5
		1985	4,2	2000	2,0
		1986	3,3	2010-	1,5
		1987	3,2		
		1988	3,0		
		1990-	2,4		
Netto sedimentation	t/år	1980	-1,5	1978	4
		1990	-1,1	1989	-6
		1996	0	1993	0,5
		2001-	0,7	1995	7
				1998-	1
Brutto sedimentation	pct. af P-pulje		52		38

skala forsøg, og benytte massebalanceligningen som model til at teste hypotesen "ilt kontrollerer fosfor". Vi kan regne på to scenarier.

Scenarie 1: Iltning af bundvandet holder fosfor i sedimentet, frigivelsen R sættes til nul, dvs. nettosedimentation (S - R) er lig brutto-sedimentation S bestemt ved ligning (3). Resultat af scenarie 1 er vist som blå kurver på figur 1.

Scenarie 2: Iltning har ingen effekt på sedimentets evne til at binde fosfor, dvs. nettosedimentation (S - R) bestemmes fra fosforbalancen ved ligning (4). Resultat er vist som sorte kurver på figur 1.

De to scenarier sammenlignes med faktiske analyser for søernes fosforbeholdning. Sorte punkter på figur 1. Analyserne kommer fra miljøportalens STOQ database. Karakteristika for søerne fremgår af Tabel 1.

Sammenligning af de to scenarier viser, at iltning ikke har øget sedimentets evne til at holde på fosfor. Målingerne af fosforpulje i søerne beskrives bedst ved scenarie 2. Hypotesen "Ilt kontrollerer fosfor" kan dermed ikke bekræftes.

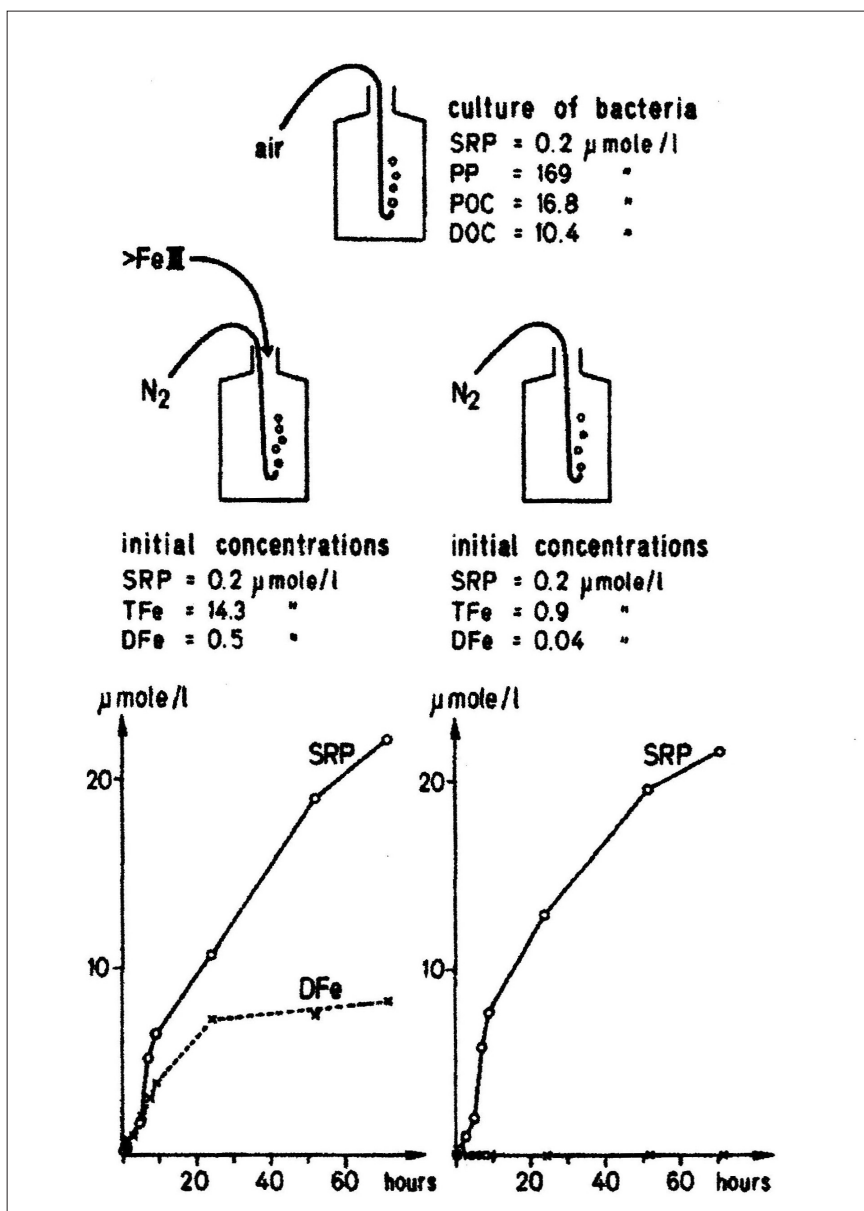
Vi ser heller ingen effekt i retning af, at iltning mindsker frigivelse af fosfor fra sedimentet (de grå søjler i figur 1). Særlig i Hald Sø er der en aftagende tendens, som netop er at forvente, når brutto-sedimentationen S aftager, og nærmer sig søens maksimale bindingskapacitet. Furesøen har haft store ændringer i fosforfrigivelsen, med stigninger og fald i 1990'erne. Årsag ukendt. Efter iltningen blev startet er der ikke sket større ændringer. Fosforpulje, frigivelse og nettosedimentation har ligget på samme niveau som i årene umiddelbart før iltningen.

Sedimentet iltfri selv om vandet iltes

En af grundene til at sedimentet ikke binder fosfor, som man måler i laboratorieforsøg på sedimentprøver med iltet henholdsvis iltfri vand, er, at i den rigtige sø dækkes sedimentoverfladen af sedimenterede alger, brutto-sedimentation S. Iltforbruget til nedbrydning af alger gør sedimentet iltfri allerede få millimeter nede. Dette kan vises ved måling med mikroelektrode (Figur 2). Jernbundet fosfor bliver derfor frigivet når ferri-jern reduceres, og opløses til ferro-jern, selv om vandet oven over er ilttholdigt. Binding af fosfor i de iltfri sedimentlag sker til reduceret jern i form af krystallinsk ferrosulfat (vivianit).

Bakterier frigør fosfat

Ja men hov - hvad så med den samtidige opløsning af ferrojernet og fosfat under iltfri forhold, beviser det ikke, at fosfat var bundet til jern, da sedimentet var iltet? Ikke nødven-



Figur 3. Frigivelse af fosfor og opløsning af jern fra anoxisk bakteriekultur. Efter Gächter /6/.

digvis. Det viser følgende eksperiment /6/.

Sedimentbakterier blev dyrket i en kultur med ilt og fosfat. De optog næsten alt fosfat i biomassen. Derefter blev kulturen delt i to. En delkultur med tilsat ferrihydroxid, og én uden. Da der ikke var opløst fosfat i vandet, kunne jernet ikke binde fosfat. De to delkulturer blev nu beluftet med nitrogen for at fjerne ilt. Inden for tre timer begyndte kulturene at frigive fosfat og jern. Det viser sig, at sedimentbakterier oplagrer fosfor som polyfosfat, når der er ilt, og bruger det som energikilde, når systemet bliver iltfri. Frigivelsen af ferrojernet og fosfat i dette eksperiment er således resultatet af to af hinanden uafhængige processer. Polyfosfat-akkumulerende bakterier anvendes i renselanlæg til biologisk fjernelse af fosfor fra spildevand /7/.

Konklusion

Hvad sker, hvis vi slukker for ilt? Ja, ifølge gennemgangen her i artiklen synes svaret at være: "Ingenting". Iltning af bundvandet har tilsyneladende ingen varig effekt på sedimentets evne til at binde fosfor. Faldet i søernes fosforpulje kommer fra reduktion i den eksterne tilførsel af næring, nettosedimentation betinget af oplandets geologi og udskylning af fosforoverskud fra tidligere tiders udledning af spildevand.

Retfærdigvis må vi nævne, at iltning af bundvandet også har betydning for dyrelivet og fiskelivet. Det er af hensyn til fisk og krebs, at iltning bliver flittigt brugt i dambrug og akvakultur. Men iltningen af Hald Sø og Furesø har haft fokus på fosfor, og ikke på fisk og krebs.

Referencer

- /1/ Einsele, W. 1936. Über die Beziehung des Eisenkreislaufs zum Phosphorkreislauf in eutrophen Seen. Arch. Hydrobiol. 29:664-686.
- /2/ Mortimer, C.H. 1941. The exchange of dissolved substances between mud and water in lakes. J. Ecology 29:280-329.
- /3/ Rasmussen, K. og Jakobsen, T.S. 2007. Hald Sø. Sørestaurering i Danmark. Del II. DMU rapport nr. 636:101-111.
- /4/ Geertz-Hansen, O. og Jensen, K.S. 2018. Furesøsmiljøtilstand 2017. Effekten af ilttilførsel. Teknisk Rapport nr. 01, 2018. OGH Consult.
- /5/ Gächter, R. og Wehrli, B. 1998. Ten Years of Artificial Mixing and Oxygenation: No Effect on the Internal Phosphorus Loading of Two Eutrophic Lakes. Environ. Sci. Technol. 32:3659-3665.
- /6/ Gächter, R. 1987. Lake restoration. Why oxygenation and artificial mixing cannot substitute for a decrease in the external phosphorus loading. Schweiz. Z. Hydrol. 49:2:170-185.
- /7/ Hupfer, M., Gloess, S. og Grossart, H.-P. 2007. Polyphosphate accumulating microorganisms in aquatic sediments. Aquatic Microbial Ecology 47:299-311

BENJAMIN NIELSEN er biolog bn@soedoktoren.dk



Opdag havets skjulte skat

Af biolog, cand. scient. Carsten Hunding

Nu er den omsider kommet. Bogen, der i sine to bind løfter sløret for rigdommen af havalger i vore danske farvande. De tæller mere end 350 arter, og bliver vist frem, så vi kan forundres og nyde.

Tidspunktet er helt rigtigt. Aldrig før har det været så vigtigt at vide, hvad vi kan møde og få glæde og gavn af derude i havet. Det gælder både, når vi skal bremse tabet af dyre- og plantearter, og når vi skal finde nye måder at skaffe føde på.

Biodiversitet, føde og klima

Vores klode er i tidens løb blevet befolket med et væld af levende væsener, der skaber ideelle livsbetingelser for os mennesker og forsyner os med føde, lægemidler og andre goder. Med den nye bog kan vi bedre holde øje og gribe ind, hvis bestanden af havalger udvikler sig i den forkerte retning.

Havalger, der også kaldes tang, er især i Østen en del af den daglige kost og har været det længe. Herhjemme er vi så småt begyndt at nippe til algerne, når vi spiser sushi. Det er blot den spæde begyndelse.

Det er velkendt, at havdyr som torsk og rødspætte, musling og reje er sunde fødevarer. Der er dog grænser for, hvor mange vi kan fange. Flere bestande er allerede så hårdt pressede, at de ikke tåler yderligere rovdrift.

Derfor må vi gå på jagt efter andre sunde fødekilder. Her er havalgerne storfavorit. De bugner nemlig af flere af de næringsstoffer, vi har mest brug for. For eksempel de særlige omega 3-fedtsyrer, vi nok bedst kender fra fisk og skaldyr. Ellers fylder fedtstofferne ikke me-

get. Det gør til gengæld mineraler, vitaminer, fibre og kulhydrater.

Er det også godt for klima og miljø at spise havalger? Ja, for planteføde belaster CO₂-regnskabet betydeligt mindre end dyrisk føde. En stor del af plantestoffet går jo tabt, fordi dyrene skal omdanne det til dyrestof, vokse og fare omkring, inden vi kan sætte tænderne i dem.

Her kommer havalgerne

Danmarks Havalger giver for første gang et veldokumenteret overblik over havalgerne og de steder, hvor de vokser. Flere af arterne er ikke tidligere præsenteret på dansk.

Havalger kan inddeles i tre grupper: Røde, brune og grønne. Rødalgerne indtager bogens første bind, brun- og grønne det andet. Det hele indledes med et indblik i havalgernes udseende og opbygning, farvestoffer og formeringsmåder, samt deres voksesteder, betydning for livet i havet, og det vi kan bruge dem til.

Vi kan læse, hvordan de utallige og detaljerede oplysninger er fremskaffet gennem kyn-dige og flittige forskeres indsamlinger, registreringer og eksperimenter. Flere danskere har ydet en særlig indsats, så algerne har fået navn efter dem. Det gælder rødalgen *Bangia*, en smuk, tynd tråd, og den lille grønalge *Rosenvingiella*. Senest møder vi den spinkle grønalge *Ruthnielsenia tenuis*, der borer sig ind i tomme muslingeskaller.

Nu løftes sløret

Herefter præsenteres de hjemlige havalger, en efter en. Hvis ellers de særlige fagudtryk har sat sig fast inde i hovedet på læseren, gør forfatterne det let at få mere at vide om algerne. De er beskrevet med almindelige ord. Skulle et fagudtryk være smuttet, træder ordforklaringer sidst i bogen hjælpende til.

Hver art er illustreret, ofte i både hel figur og detalje, med tydelig markering af de kendetegn, man skal bruge for at bestemme dem. Flere steder slippes humoren løs, som ved Søsalat, hvor vi bliver opfordret til at lege med kønscellerne. Med udførlig brugsanvisning,

En særlig hjælp er de såkaldte nøgler, hvor man punkt for punkt skal svare på spørgsmål om, hvordan algerne ser ud og er opbygget. Der er en hovednøgle til slægterne inden for hver af de tre grupper, og specialnøgler, der fører fra slægt til art. Også her har forfatterne gjort det nemt, ved at bruge almindeligt sprog og lægge vægt på de kendetegn, man kan se med det blotte øje eller en god lup.

Derimod har det ikke været let for forskerne selv at beskrive alle alger præcist. Kun et par håndfulde havalger er nemlig så store og karakteristiske, at man kan bestemme dem ude i deres rette element. Resten må man tage med hjem og kigge nærmere på. For det meste i mikroskop. Eller endnu mere besværligt: Dyrke algerne ved forskellige temperaturer og belysninger, så de udvikler de kendetegn, der er afgørende.

Især de sirlige småbuske af rødalger er kønne at se på, både ude i havet og klæbet op på hvidt papir. I Danmarks Havalger fremstår de som små kunstværker. På den måde bliver bogen et smukt resultat af al den viden, der er skabt gennem flere hundrede års grundforskning, og som forfatterne har formået at fordele overskueligt og indbydende, så den er lige til at bruge.

Ruth Nielsen og Steffen Lundsteen: Danmark Havalger 1-2. Bind 1: Rødalger (Rhodophyta), 398 sider. Bind 2: Brunalger (Phaeophyceae), Grønalger (Chlorophyta), 476 sider. Det Kongelige Danske Videnskaberne Selskab; Scientia Danica, Series B, Biologica, vol. 7-8. Sælges samlet for kr. 500.

