

Gyldensteen Strand – fra agerland til kystlagune

Det var en stor begivenhed, da Aage V. Jensens Naturfond i 2014 åbnede digerne mod havet ved Gyldensteen inddæmmede strand på Nordfyn, og havvand oversvømmede 214 ha landbrugsjord. Biologerne fra Syddansk Universitet har de seneste knap to år med stor spænding fulgt livet i den nye kystlagune. Bundlevende alger og dyr ankom hurtigt til det næringsrige område, men udviklingen har siden budt på flere overraskelser i takt med udvaskningen af næringsstoffer.

ERIK KRISTENSEN, MOGENS R. FLINDT,
SANDRA WALLØE THORSEN, MARIANNE
HOLMER & THOMAS VALDEMARENSEN

Historie

Gyldensten Inddæmmede Strand blev etableret i 1871 ved en omfattende landvinding og dræning af ca. 616 hektar kystlagune øst for Bogense på Fyn. Det skete ved at bygge 2273 m diger mellem Lille Stegø, Store Stegø, Lindholm og Langø over Fåreholm til Jersorepynten. Det inddæmmede område skulle bruges af Gyldensteen Gods til landbrug /1/. Det viste sig hurtigt, at området var svært at dræne og dyrke på normal vis. På trods af yderligere dræning i 1960'erne forblev jorden marginaliseret, og tanker om at genskabe de oprindelige vådområder fremkom i 1980'erne. Disse tanker blev først en realitet, da Aage V. Jensen Naturfond erhvervede hele området i 2011. Naturfonden ønskede at genskabe et nordfynsk vadehav (Gyldensteen Kystlagune) på 214 hektarer ved at fjerne digerne mellem Store Stegø, Lindholm og Langø. Et nyt dige fra fastlandet til Langø sørger nu for, at den østlige del af inddæmningen, fremstår som en lavvandet sø på 144 hektar omgivet af rørskov (Engsøen). Det nordøstlige areal på 258 hektarer ("Reservatet") forbliver som enge, sumpe og søer. Planerne blev efter tovtrækning med myndighederne og et større entre-

prenørarbejde en realitet, da digerne blev gennembrudt den 29. marts 2014 (Figur 1).

Naturgenopretning

Aage V. Jensen Naturfond havde til formål med projektet, at genskabe et af Nordfyns vigtigste naturområder, og give offentligheden adgang til at opleve den nye natur og det rige fugleliv. Der var dog også mere videnskabelige formål med projektet, som bestod i at undersøge konsekvenserne af klimabetingede havstigninger, når lavtliggende kystområder i fremtiden oversvømmes, herunder at beskrive hvor hurtigt områdets flora og fauna etablerer

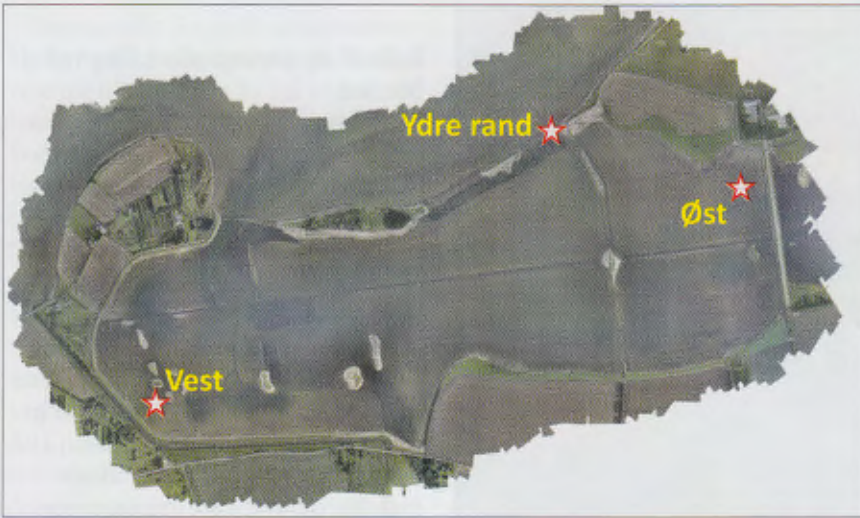
sig og skaber et stabilt økosystem, og om der er en klimagevinst med hensyn til kulstofdeponering.

De biologiske undersøgelser

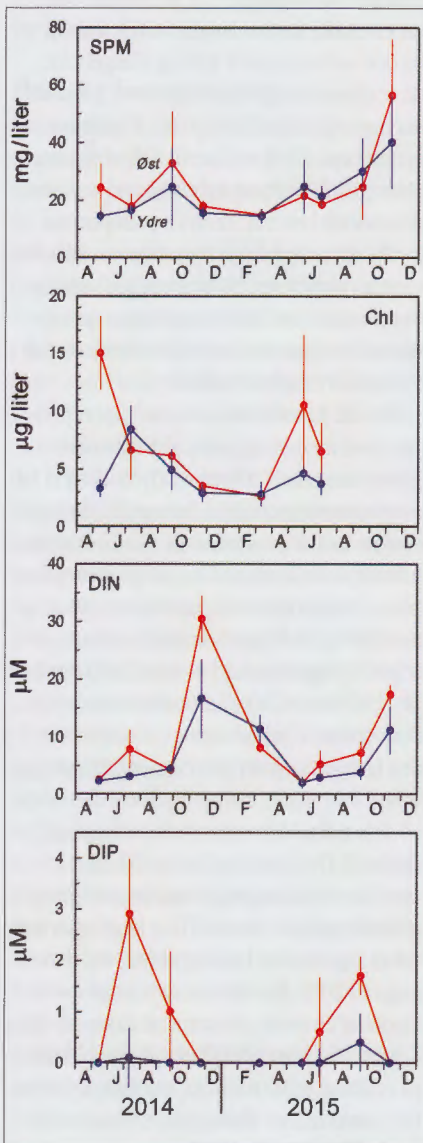
Forskningsgruppen for økologi på Syddansk Universitet blev inviteret af Aage V. Jensen Naturfond til at udføre vandkemiske, biogeo-kemiske og biologiske undersøgelser i den nye marine kystlagune, så den tidlige udvikling og succession i miljøtilstanden kunne følges nøje helt fra starten. Faktisk begyndte arbejdet allerede i 2013, året før oversvømmelsen, med at beskrive jordbundens



Figur 1. Kort over Gyldensteen Inddæmmede Strand med angivelse af de tre delområder, som Aage V. Jensens Naturfond i 2014 omdannede til Kystlagunen, Engsøen og enge (Reservatet).



Figur 2. Luftfoto af Gyldensteen Kystlagune (September, 2015) med angivelse af de vigtigste indsamlingslokaliteter



Figur 3. Årstidsvariation (2014-2015) i suspenderet partikulært materiale (SPM), Klorofyl a (Chl), opløst uorganisk kvælstof (DIN = $NH_4^+ + NO_3^-$) og opløst uorganisk fosfor (DIP = PO_4^{3-}) i vandfasen på den ydre rand og i den østlige ende (øst)

struktur, næringsindhold og CO_2 afgivelse på et stort antal stationer i det område, der skulle blive til kystlagunen. Undersøgelserne i årene efter oversvømmelsen er opdelt i 3 overordnede temaer: 1. Vandets dynamik og udskiftning med fokus på næringsstoffer og suspenderet stof; 2. Kulstof- og næringsstofomsætning i den oversvømmede jordbund; og 3. Successionen af bundlevende flora og fauna på, ved og i bunden. I det følgende præsenteres de vigtigste resultater fra de første 18 måneders undersøgelser efter oversvømmelsen.

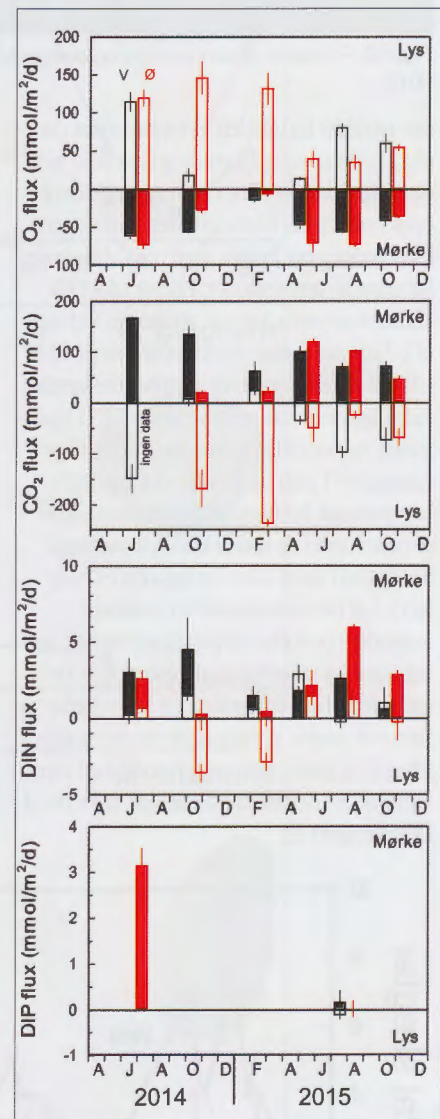
Vandudskiftning og næringsstoffer

Den nye kystlagune er lavvandet og ca. 90% af arealet har en gennemsnitlig vanddybde på mindre end 1 m. Der findes dog to huller med en dybde på op til 8 m, et i vest og et i øst, hvor der blev gravet ler til opbygningen af nye diger mod land. Der er tre åbninger til havet (Nordlige Lillebælt) udenfor. Den dybeste åbning, som har størst vandføring, ligger mellem Store Stegø og Lindholm, mens de to andre og mere lavvandede ligger mellem Lindholm og Langø. Selv om tidevandet i området er begrænset til ± 20 cm ved springflod, bliver ca. 40% af vandet udskiftet to gange i døgnet. Opholdstiden for vandet i lagunen er derfor meget kort, få dage eller mindre. Faktisk kan vindstuvning ændre vandstanden med over 1 m i løbet af få timer. Vandmasserne ved Gyldensteen Strand er således meget dynamiske og giver mulighed for stor transport af næringsstoffer, fine partikler, alger, havgræsser, fisk og alle mulige andre dyr ud og ind af lagunen.

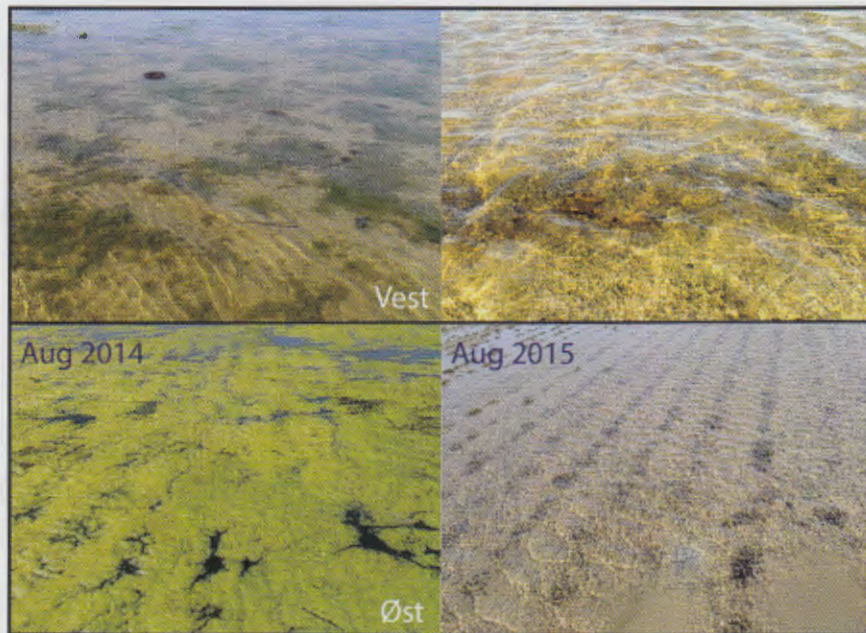
Vandprøver udtaget over adskillige dage med automatisk prøvetager på den ydre rand og i den østlige del af lagunen (Figur 2) 4-5 gange om året viste på intet tidspunkt noget

klart tidevandsmønster. Dette indikerer, at vindbetingede strømningsforhold dominerer vandskiftet. Blandt de undersøgte vandparametre viste suspenderet partikulært materiale (SPM), klorofyl a (Chl), opløst uorganisk kvælstof (DIN = $NH_4^+ + NO_3^-$) og opløst uorganisk fosfor (DIP = PO_4^{3-}) til gengæld tydelige årstidsvariationer og forskelle mellem den indre og den ydre del af lagunen (Figur 3).

SPM havde et ret højt basiseniveau på ca. 15 mg/liter uanset lokalitet, og steg til 30-60 mg/liter ved kraftig blæst i sensommeren 2014 og efteråret 2015. Til sammenligning er SPM i andre kystnære områder og det sydlige Kattegat normalt omkring 1-2 mg/liter. Det generelt høje SPM-niveau i Gyldensteen kystlagune skyldes den lave vanddybde, hvor selv svage vinde skaber vandstrømme, som ophvirvler



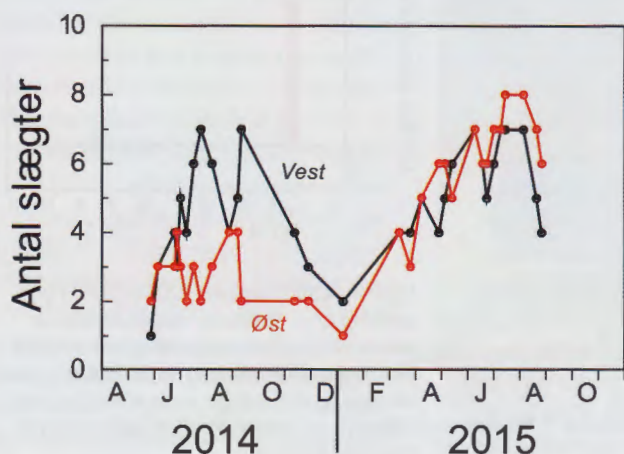
Figur 4. Årstidsvariation (2014-2015) i udveksling af ilt, kuldioxid, opløst uorganisk kvælstof og opløst uorganisk fosfor mellem den oversvømmede jord og vandfasen i den vestlige og den østlige ende af kystlagunen i dagslys og mørke. Positive søjler angiver frigivelse fra jorden.



Figur 5. Fotoserie af den vestlige og østlige ende af kystlagunen i august 2014 og august 2015.

fine partikler fra bunden. Fytoplanktonet (klorofyl *a*) udviste en opblomstring i det sene forår og tidlige sommer både i 2014 og 2015. Denne opblomstring var ikke kun styret af den øgede lysindstråling om foråret, men også af tilgængeligheden af næringsstoffer. Faktisk faldt DIN koncentrationen på grund af algerne forbrug til 2-7 μM om sommeren fra et niveau på 20-30 μM om vinteren, generelt med højeste værdier inde i lagunen. Sommerniveauet af DIN i kystlagunen var betydeligt højere end i det sydlige Kattegat (<1 μM) og var dog på ingen måde begrænsende for fytoplanktonvæksten. Dette afspejles også i de højere klorofylkoncentrationer end i havet uden for lagunen (<2 $\mu\text{g/liter}$). DIP blev kun observeret i målbare mængder i perioden fra juni til september og må anses for at være vækstbegrænsende for fytoplankton i det tidlige forår og sene efterår. Generelt udviste kystlagunens vandparametre i løbet af de første 18 måneder stor lighed med forholdene i den næringsbelastede indre del af Odense Fjord /2/.

Det var forventet, at næringsstofkoncentrationerne ville være høje i lagunen lige efter oversvømmelsen på grund af udsivende gødningsrester fra den tidligere dyrkede jordbund. Dette synes til dels at være tilfældet, men både DIN og DIP niveauerne var faktisk lave de første to måneder på grund af et stort optag fra hurtigtvoksende alger (fytoplankton og bundlevende alger). Ydermere viser koncentrationforskelle i DIN og DIP mellem stationer på den ydre rand og inde i lagunen, at der eksporteres næringsstoffer i den første tid efter oversvømmelsen. De høje koncentrationer af DIP om sommeren skyldtes sandsynligvis frigivelse af jernbundne P-puljer på grund af en mindsket iltne drængning i bunden og tilknyttet reduktion af iltet jern. Det er bemærkelsesværdigt, at de maksimale sommerværdier af DIP og vinterværdier af DIN faldt til det halve fra 2014 til 2015. Hvilket tyder på en hurtig udvaskning af de mest letom sættelige næringsstofpuljer i bunden.



Figur 6. Årstidsvariation (2014-2015) i antal algeslægter i den vestlige og østlige del af kystlagunen.

Kulstof- og næringsudveksling ved bunden

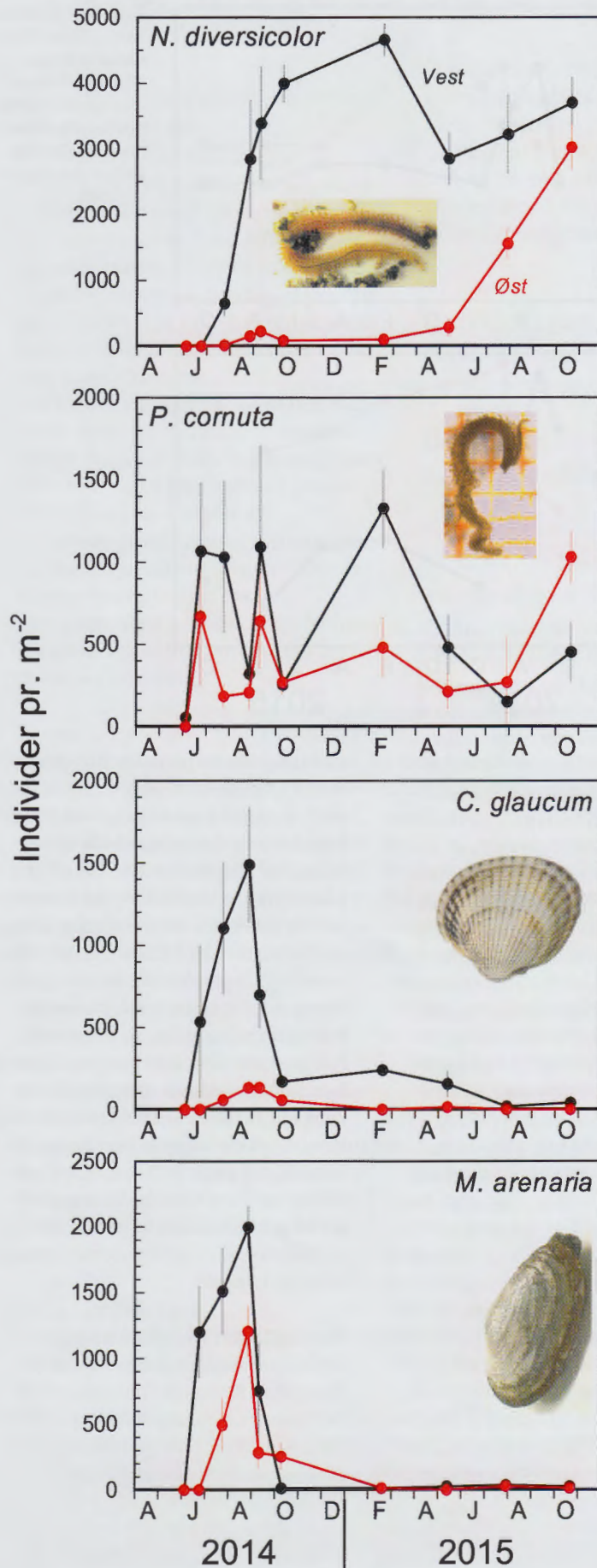
Udvekslingen af O_2 , CO_2 , DIN og DIP mellem den oversvømmede jord og det overliggende vand blev målt i felten med bundkamre fire gange om året i både den vestlige og østlige ende af lagunen (Figur 2). Da resultaterne fra O_2 og CO_2 målinger er næsten identiske spejlbilleder, vil kun sidstnævnte blive omhandlet her (Figur 4). I dagslys var der en stor primærproduktion i både vest og øst i forsommeren 2014, hvilket skyldes en hurtig opblomstring af bundlevende blågrønner umiddelbart efter oversvømmelsen. Disse blev afløst af forskellige opportunistiske makroalger, som gav anledning til høj produktivitet i øst helt hen til februar 2015, mens den hurtigt aftog i vest. Det skyldes sikkert, at græsstubbe som var efterladte fra dyrkningen i 2013, stak op fra den oversvømmede jord og tilbageholdt de opblomstrende makroalger i øst. I vest var der ingen græsstubbe på grund af omfattende gravearbejde i forbindelse med digebygningen. Senere i 2015 var primærproduktion ved bunden tydeligt styret af især lys og temperatur. Jordbundens forbrug af ilt i mørke var forholdsvis stor i sommeren 2014, og aftog efterår og vinter – især i øst. Iltforbruget fulgte derefter variationen i temperaturen på et niveau typisk for kystnære marine områder /3/.

Hvis de to målestationer anses for repræsentative for hele lagunen, så frigives der i mørke årligt ca. 3.200 tons CO_2 fra det 214 ha oversvømmede område. Denne CO_2 emission opvejes helt af en tilsvarende CO_2 optagelse af primærproducenterne i lys, så der på årsplan ikke er nogen netto CO_2 udveksling. Til sammenligning blev der på samme areal målt en årlig CO_2 frigivelse fra den tørre jord i mørke på 12.300 tons i 2013 før oversvømmelsen. Den næsten 4 gange højere CO_2 frigivelse i den tørlagte jord skyldes en større ilttilgængelighed dybt nede i jorden og dermed en mere effektiv mikrobiel nedbrydning af organisk (kul)stof. Der synes derfor umiddelbart at være en stor klimagevinst ved oversvømmelse af landbrugsjord. Der skal dog først tages hensyn til afgrøderne binding af CO_2 ved dyrkningen i 2013. Hvis det antages, at en dyrket mark har en netto primærproduktion på 600 g $\text{C}/\text{m}^2/\text{år}$ /4/, svarer det til en tilbageholdelse på omkring 4.700 tons CO_2 om året på 214 ha. Den umiddelbare klimagevinst ved at oversvømme kystlagunen har således været ca. 7.600 tons CO_2 om året, og den skyldes primært at netto-nedbrydningen og fjernelsen af organisk stof, som typisk sker i iltholdige jord under landbrugsdrift /5/, næsten ikke foregår i den iltfrie oversvømmede jord.

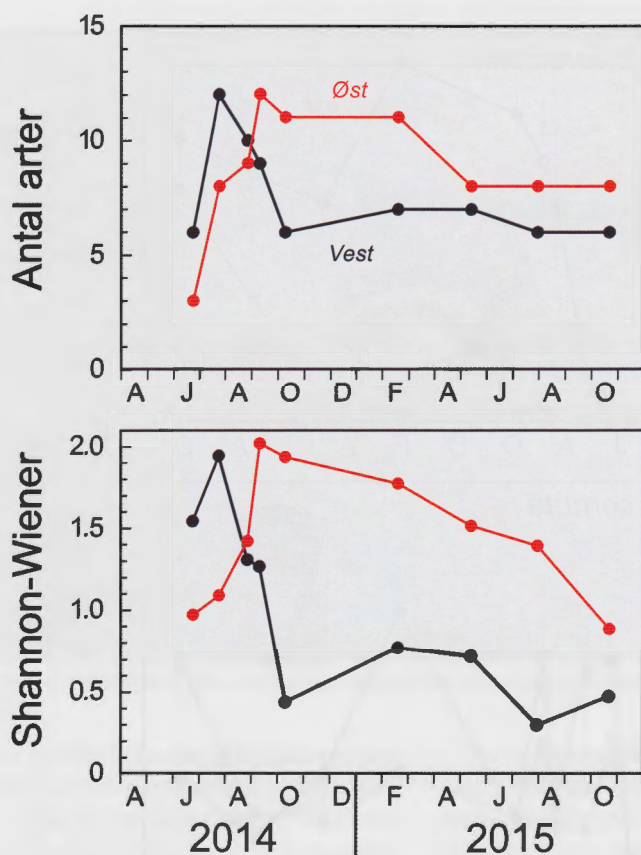
Næringsstoffer blev også i vid udstrækning frigivet fra den oversvømmede jord. Således varierede DIN frigivelsen fra 1 til 5 mmol/m²/d i mørke. Selv i lys var frigivelsen i løbet af de første 18 måneder ofte større end det algerne kunne optage til vækst, lige undtagen i den østlige ende af lagunen i oktober og februar. Det ser derfor ud til, at gødningsrester fra før oversvømmelsen og nedbrydning af kvælstofholdigt organisk materiale i jorden er kilden til eksport af DIN fra lagunen – især om vinteren. DIP frigivelse fra den oversvømmede jord blev kun observeret i øst om sommeren 2014, præcist på det tidspunkt hvor DIP koncentrationen i vandfasen toppede. På intet andet senere tidspunkt blev der observeret DIP udveksling af betydning. Noget tyder dog på en mindsket frigivelse i sommeren 2015, da koncentrationen af DIP i vandfasen dette år var halvt så stor som i sommeren 2014.

Flora- og faunaudvikling

Der viste sig hurtigt en rig flora og fauna efter oversvømmelsen. Der drejede sig især om arter, som blev ført med vandet ind i lagunen fra kystområdet udenfor. Der var i de første måneder et myldrende liv af alger, små fisk (kutlinger og hundestejler), fjordrejer, tanglopper og insektlarver (vandfluer). Algerne var i starten domineret af mikroskopiske blågrøn-alger, som dækkede alle overflader i foråret 2014. Hen på forsommeren kom så de opportunistiske makroskopiske grøn-alger, først var det arter tilhørende slægten *Enteromorpha* (rørhinde) dernæst *Cladophora* (vandhår). Senere dukkede også forskellige arter af rød-alger og brun-alger op. Grøn-algerne udviklede sig eksplosivt i øst hen over sommeren 2014, hvor stubbene fra afgrøderne i 2013 forhindrede bortskylning, samtidigt med at næringsstofniveauet var højt. Der dannede sig således et massivt grønt dække, som toppede i august med en tykkelse på op til 30 cm i hele den østlige ende af lagunen (Figur 5). I vest var algeopblomstringen mere begrænset i sommeren 2014, med spredte drivende totter af op til 7 algeslægter i grønne, røde og brune nuancer (Figur 6). Til sammenligning fandtes der kun 2-4 slægter af alger i de massive måtter i øst. Algerne drev i løbet af efteråret og vinteren ud af lagunen eller blev nedbrudt, selv om de stadigvæk bidrog med betydelig primærproduktion helt hen i februar 2015. En tilsvarende algedynamik var forventet 2015, men denne udeblev. Den manglende algevækst dette år skyldes sandsynligvis næringsstofbegrænsning, om end det kolde vejr i forår og sommer 2015 også begrænsede væksten. Til gengæld steg antallet af observerede algeslægter i både vest og øst til 7-8.



Figur 7. Årstidsvariation (2014-2015) i antal individer pr. m² af de dominerende arter bundfauna i den vestlige og østlige ende af kystlagunen.



Figur 8. Årstidsvariation (2014-2015) i antal arter og Shannon-Wiener diversitetsindeks hos bundfaunaen i den vestlige og østlige del af kystlagunen.

vigtigste primærproducenter i lagunen, mens havgræsser måske vil etablere sig i de dybe dele af kystlagunen. Hvis kystlagunen forbliver næringsfattig, vil der ikke være føde nok til en individrig bundfauna, men artsdiversiteten må dog forventes at stige i forhold til den nuværende situation. Det er vigtigt at følge denne udvikling, så det kan forudsiges om og hvornår kystlagunen vil udvikle sig som et naturligt vadehav med en stabil flora og fauna. Det er jo grundlaget for en alsidig natur med et spændende fugleliv.

Referencer

- /1/ Hansen, K. 2014. Folk & Fortællinger fra det Tabte Land, Bind 2: Øerne, Bæredygtighed.
- /2/ Fyns Amt. 2004. Vandmiljøovervågning—Kystvande2003. Odense: Fyns Amt.
- /3/ Kristensen, E. 1993. Seasonal variations in benthic community metabolism and nitrogen dynamics in a shallow, organic poor Danish lagoon. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 36: 565-586.
- /4/ Wang, Y., Hua, C., Dong, W., Li, X., Zhang, Y., Qin, S., Oenema, O. 2015. Carbon budget of a winter-wheat and summer-maize rotation cropland in the North China Plain. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 206: 33-45.
- /5/ Gyldenkerne, S., Münier, B., Olsen, J.E., Olesen, S.E., Petersen, B.M., Christensen, B.T. 2005. Opgørelse af CO₂-emissioner fra arealanvendelse og ændringer i arealanvendelse. LULUCF (Land Use, Land Use Change and Forestry). Metodebeskrivelse samt opgørelse for 1990 – 2003. Danmarks Miljøundersøgelser.
- /6/ Kristensen, E., Delefosse, M., Quintana, C.O., Flindt, M.R., Valdemarsen, T. 2014. Influence of benthic macrofauna community shifts on ecosystem functioning in shallow estuaries. *Frontiers in Marine Science* 1: article 41 (doi: 10.3389/fmars.2014.00041)

Lektor ERIK KRISTENSEN, Biologisk Institut, Syddansk Universitet, arbejder med marine økosystemers funktion bl.a. bundfauna, mikrobiel økologi og biogeokemi (ebk@biology.sdu.dk)

Lektor MOGENS R. FLINDT, Biologisk Institut, Syddansk Universitet, arbejder med systemanalyse og modellering af akvatiske økosystemer med fokus på genetablering af ålegræsbede.

PhD-studerende SANDRA WALLØE THORSEN, Biologisk Institut, Syddansk Universitet, arbejder med den tidlige succession af flora og fauna i Gyldensteen Kystlagune.

Professor MARIANNE HOLMER, Biologisk Institut, Syddansk Universitet, arbejder med økologi i kystzonen med fokus på samspil mellem økologi og biogeokemiske forhold i sedimentet

Lektor THOMAS VALDEMARSEN, Biologisk Institut, Syddansk Universitet, arbejder med marine økosystemers funktion, bl.a. biogeokemisk omsætning af organisk stof i sedimentet.

Som tidligere nævnt var faunaen i foråret 2014 lige efter oversvømmelsen domineret af fritsvømmende opportuniste, som let kunne indvandre og kolonisere området. De hvirvelløse bunddyr kom først hen på forsommeren (Figur 7). Det var ret overraskende, at de først tilkomne var hjertemuslinger (*Cerastoderma glaucum*), sandmuslinger (*Mya arenaria*) og en lille rørboende børsteorm (*Polydora cornuta*). Alle de fundne individer var i starten meget små, og må være ført ind i lagunen som drivende planktoniske larver. Frynseorme (*Nereis (Hediste) diversicolor*), som har bundlevende larver, blev først registreret i juli. Bunddyrene trivedes tydeligvis ikke godt i den iltfrie bund under det tætte lag af grønalg i øst, mens der var langt flere bunddyr i vest. I løbet af sommeren 2014 steg artsantallet af bunddyr i både vest og øst til 12. De fleste andre end ovennævnte, som f.eks. sandorme og blåmuslinger, var ikke ret hyppige, dog med undtagelse af dansemyggelarver (*Chironomus* spp.), som var almindelige til foråret 2015. Samtidigt med at antallet af frynseorme steg eksplosivt i vest hen over efteråret 2014, forsvandt næsten alle hjertemuslinger og sandmuslinger pludseligt i løbet af september. Årsagen til frynseormenes succes og muslingernes deroute er uklar. Måske sultede muslinger ihjel på grund af den høje turbiditet og forholdsvis lave indhold af plankton i vandet. Frynseorme var under alle omstændigheder suverænt den mest succesfulde art i vest

med et individantal på næsten 5000 pr. m², mens *P. cornuta* var til stede hele tiden i svingende antal. Til sammenligning forekommer frynseorme sjældent med individantal over 3000 pr. m² i Odense Fjord /6/. Det er bemærkelsesværdigt, at antallet af bunddyrarter i vest faldt fra 12 til kun 6 i løbet af efteråret 2014 og artsdiversiteten faldt fra 1.9 til 0.4. Der er ikke andre forklaringer på denne dramatiske udvikling end at frynseormene har udkonkurreret de andre arter under de ekstreme forhold med periodevis tørlægning og mangel på føde. Dette bekræftes af, at antallet af arter forblev på 11 i øst helt hen til foråret 2015, og først faldt på det tidspunkt hvor frynseormenes antal steg meget fra få hundrede til over 3000 pr. m². I vest skete der forbavsende få udviklinger i bundfaunaen i løbet af 2015, og situationen med mange frynseorme og kun få andre arter fortsatte.

Forventninger til fremtiden

Det bliver spændende at følge udviklingen i Gyldensteen Kystlagune i de kommende år. Det forventes, at næringsstofniveauet vil fortsætte med at falde i takt med udtømmningen af jordens næringsstofpuljer. Dette gør, at der kun er lille sandsynlighed for masseforekomst af grønalg i fremtiden – især fordi der ikke er betydelige næringsstofforsler til lagunen med vandløb og grundvand. Sporadiske forekomster af makroalger samt bundlevende kiselalger vil derfor blive de