

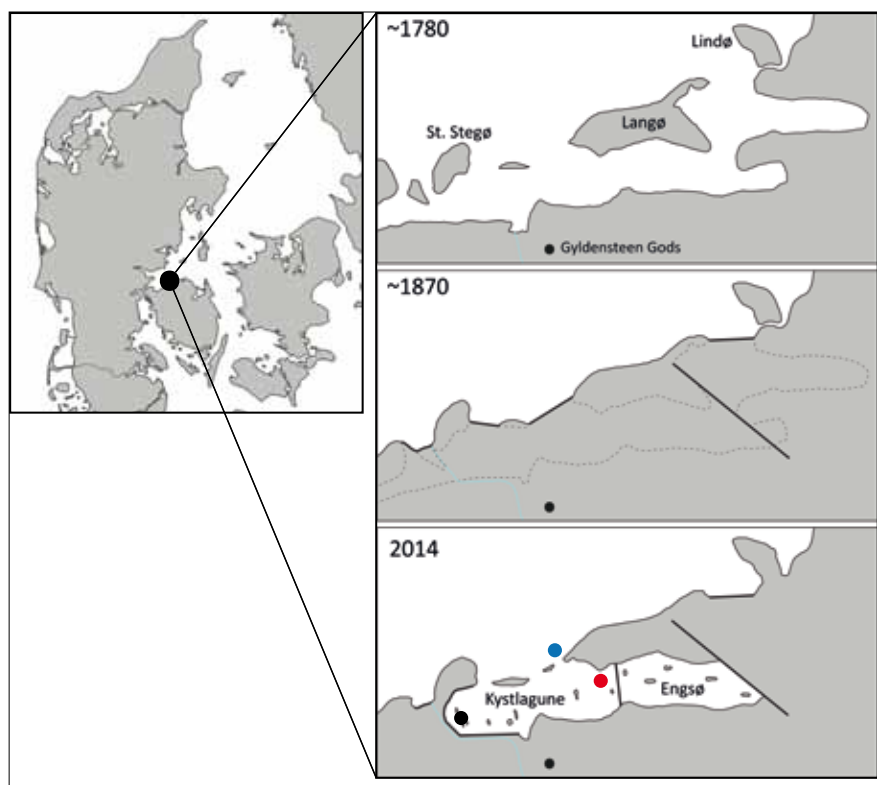
# N og P udveksling ved Gyldensteen Kystlagune

Når havspejlet i fremtiden stiger, er oversvømmelse af marginaliseret landbrugsjord (managed realignment) et muligt virkemiddel til at beskytte vore kyster. Storskala-forsøget ved Gyldensteen Strand har skabt et nyt og kystbeskyttende naturområde med stor rekreativ værdi. Årtiers ophobede næringspuljer i agerjorden frigives dog ved oversvømmelsen og kan påvirke havmiljøet i uheldig retning.

ERIK KRISTENSEN, THOMAS VALDEMAREN, MARIANNE HOLMER, CINTIA O. QUINTANA & MOGENS R. FLINDT

Klimaændringer har store konsekvenser for lavtliggende kystnære områder på grund af havstigning, højere frekvens af storme og øget nedbør. Disse hændelser kan og vil føre til massive oversvømmelser af kystnære landbrugsområder og bebyggelser med store økonomiske tab til følge. Det er problemer vi faktisk allerede har oplevet, og som med stor sikkerhed vil tiltage i styrke fremover. F.eks. forudsagde FN's Klimapanel i 2014, at havspejlet vil stige med omkring en meter frem til år 2100 /1/. Mange af de områder, som blev inddiget og tørlagt til landbrug under de massive landvindinger i 1800-tallet, er i dag så marginaliserede og næsten uanvendelige, at en beskyttelse ikke kan betale sig /2/. Her er det sundt fornuft, at lade havet vende tilbage ved den klimatilpasningsmetode, som knap så mundret hedder "managed realignment".

Hvad er så "managed realignment"? Direkte oversat "forvaltet justering (af kystlinjen)", altså med andre ord en bevidst oversvømmelse af lavtliggende kystområder. Før gamle og utidssvarende havdiger brydes ned og havet skyller ind over den dårlige landbrugsjord, skal der etableres en beskyttelse af værdifulde arealer inde i landet. Denne beskyttelse behø-



Figur 1. Kort over Danmark med angivelse af Gyldensteen Kystlagunes placering på Fyn. Kortudsnit viser kystlinjens placering i ~1780 før landvinding, i ~1870 efter landvinding og i 2014 efter genetablering af Gyldensteen Kystlagune og Engsø. Symbolerne i kystlagunen angiver målestationerne Vest (sort), Øst (rød) og Ydre rand (blå).

ver ikke at bestå i store og massive havdiger, da effekter af bølger under storme vil blive dæmpet betragteligt i de nye lavvandede lagu-

ner mellem de gamle og nye diger. En sidegevinst ved "managed realignment" er, at de nye lavvandede og vadehavsagtige laguner faktisk



Figur 2. Foto af Gyldensteen Kystlagune, som viser den massive vækst af grønalger lige efter åbningen i 2014, den fuldstændigt vegetationsfrie bund i 2015 med synlige stubbe fra tidligere afgrøder, og det massive dække af blågrønalger på bunden i 2017.

vil kunne udvikle sig til enestående naturområder med et rigt fugleliv. Der vil således blive etableret nye økosystemer med stor rekreativ værdi for naturelskere og især ornitologer.

Det ser således ud til, at "managed realignment" kun har positive effekter, altså en såkaldt win-win situation. Er der så slet ingen negative effekter? Tja, det kommer an på hvordan den oversvømmede jord har været dyrket. Hvis den har været under intensiv dyrkning med stor brug af gødning, vil markoverskuddet af N og P kunne blive frigivet til havvandet og ført væk med tidevandet. Det er endnu uklart i hvor stort omfang og hvor hurtigt markoverskuddet vil blive frigivet til vandet. Vi har på Syddansk Universitet i en årrække arbejdet med netop denne problemstilling i forbindelse med Danmarks største "managed realignment" projekt ved Gyldensteen Strand på Nordfyn. Baseret på 4 års målinger i området vil vi her kort præsentere vores resultater og modelscenarier for jordbundne N og P næringsstoffers skæbne, samt vurdere og perspektivere mulige miljøeffekter af sådanne aktiviteter langs danske kyster.

### Case study: Gyldensteen Kystlagune

Gyldensteen Inddæmmede Strand blev etableret i 1871 ved en omfattende landvinding og dræning af ca. 616 hektar kystlagune øst for Bogense på Nordfyn (Fig. 1). Det inddæmmede område skulle bruges af Gyldensteen Gods til landbrug /3/. Efter yderligere dræning i 1960'erne blev jorden dyrkbar, men forblev marginaljord med lavt udbytte, og tanker om at genskabe de oprindelige vådområder fremkom i 1980'erne. Disse tanker blev først en realitet, da Aage V. Jensen Naturfond (AVJN) erhvervede området i 2011. Naturfonden ønskede at etablere et nordfynsk vadehav (Gyldensteen Kystlagune) på 214 hektarer ved at gennembryde de ydre diger og etablere et nyt dige ved fastlandet. AVJN havde til formål at genskabe et af Nordfyns vigtigste naturområder, og give offentligheden adgang til at opleve den nye natur og det rige fugleliv. Projektet havde dog også mere videnskabelige formål, som bestod i at undersøge de biologiske og miljømæssige konsekvenser af klimabetingede havstigninger, når lavtliggende agerland i fremtiden oversvømmes. Forskningsgruppen for økologi på Syddansk Universitet blev af AVJN inviteret til at udføre vandkemiske, biogeokemiske og biologiske undersøgelser i den nye marine kystlagune, så udviklingen i miljøtilstanden kunne følges nøje helt fra starten. AVJN's planer for området blev en realitet, da digerne blev gennembrudt den 29. marts 2014 (Fig. 1).

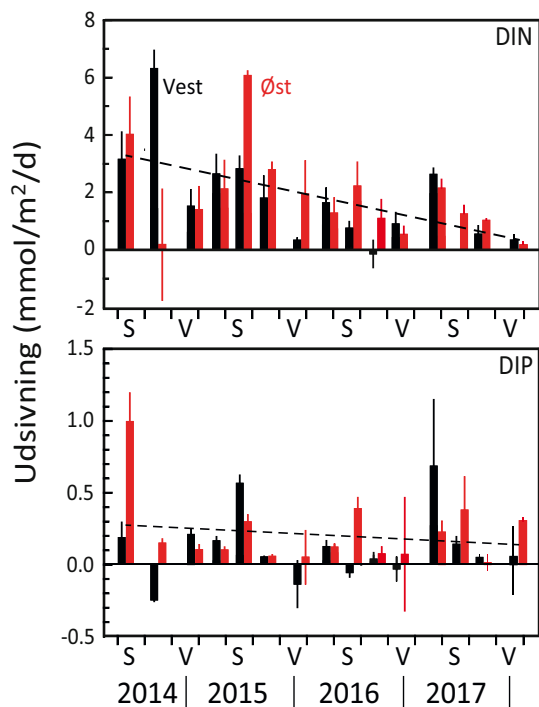
### Udvikling i N og P de første 4 år efter oversvømmelsen

En stor del af de tilgængelige uorganiske N og P puljer i jorden blev efter oversvømmelsen frigivet hurtigt på grund af det salte vands ionbytningsevne overfor ammonium og desorption af fosfat efter jernreduktion i den nu iltfrie jord. Det synlige resultat af denne frigivelse var en stor opblomstring af grønalger i løbet af den første sommer (Fig. 2-2014). I de følgende to år (Fig. 2-2015) var der ingen massiv algeopblomstring og der forekom kun spredte bevoksninger med grønne, brune og røde alger. I sommeren 2017 ændrede situationen sig radikalt og bunden i kystlagunen blev dækket af et cm-tykt lag af blågrønalger (Fig. 2-2017). Algeudviklingen fra 2014 til 2017 skyldtes tilsyneladende en hurtig udtømmning af tilgængeligt N og en mere konstant tilførsel af P fra bunden. Dette afspejles tydeligt i et markant fald i udsivningen af opløst uorganisk N (DIN) i form af ammonium og nitrat fra jorden i mørke fra 4,5 til  $<1 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , mens udsivningen af opløst fosfat (DIP) kun faldt langsomt og forblev på omkring  $0,2 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  i hele perioden (Fig. 3). Tilsvarende

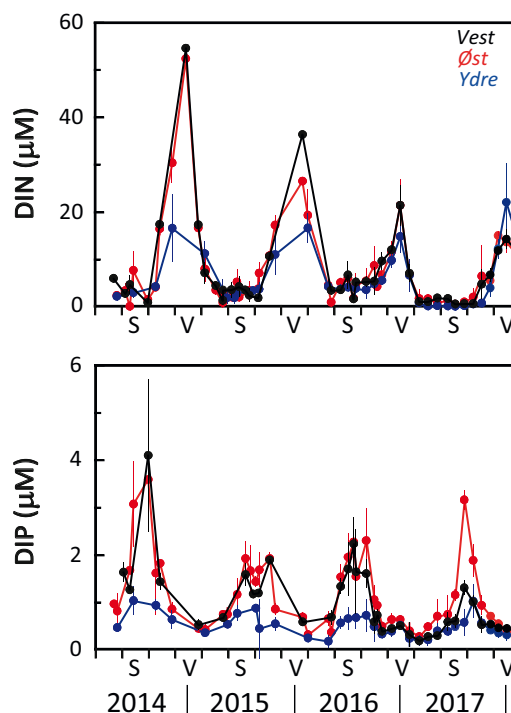
faldt den maksimale koncentration af DIN i vandet i kystlagunen om vinteren fra  $\sim 55 \mu\text{M}$  i 2014 til omkring  $20 \mu\text{M}$  i 2016 og 2017 (Fig. 4). Da vinterkoncentrationen af DIN ved den ydre rand af kystlagunen i alle årene lå på omkring  $20 \mu\text{M}$ , var der kun stor tidevandssekspert af DIN til det omgivende havmiljø i vintrene 2014-15 og 2015-16. I de efterfølgende to vintre var der ingen nettoeksport. Den maksimale DIP koncentration i vandet i kystlagunen i sommeren 2014 var på  $\sim 4 \mu\text{M}$ ; omkring det dobbelte af niveauet året efter. Derefter forblev niveauet konstant til og med 2017. Fosfat blev eksporteret fra kystlagunen med tidevandt i hele perioden fra 2014 til 2017, eftersom koncentrationen ved den ydre rand altid var  $1 \mu\text{M}$  eller derunder. Den store frigivelse og høje koncentration af DIN og DIP i 2014 forsynede åbenbart den store opblomstring af grønalger med rigelig næring dette år. Faldet i frigivelsen af DIN og de stærkt faldende koncentrationer af både DIN og DIP kunne tilsyneladende ikke understøtte vækst af makroalger i 2015 og 2016. Til gengæld gav den fortsatte frigivelse af DIP grobund for blågrønalger i 2017, da disse bakterier jo selv kan forsyne sig med N via biologisk kvælstoffiksering.

Næringsstoffer blev ikke kun transporteret ud af kystlagunen med tidevandet i opløst form. Der var også en betydelig eksport af partikulært N og P. Vi har opdelt de partikulære N og P puljer i makroskopisk drivende makrofytter fanget i udspændte net og suspenderet partikulært materiale (SPM) tilbageholdt efter filtrering af vandprøver. Der blev i vækstsæsonen om sommeren eksporteret store mængder alger (Fig. 5), mens der næsten intet materiale blev transporteret om vinteren. Mængden af makrofytter eksporteret med tidevandet i somrene fra 2014 til 2016 var i overensstemmelse med observationerne af algedækningen i kystlagunen. N og P blev i mindre grad eksporteret som SPM. Koncentrationen af SPM i vest, øst og ved den ydre rand varierede usystematisk og var mere kontrolleret af vindbetinget ophvirvling af bunden end biologiske og kemiske processer. Der var dog næsten altid højere koncentrationer af SPM-N og SPM-P inde i kystlagunen end ved den ydre rand.

Detaljerede undersøgelser af jordbundens udvikling i totalkvælstof (TN) og -fosfor (TP) fra før oversvømmelsen i 2013 til 2016 viste et markant fald for begge elementer. De øverste 20 cm af jorden indeholdt i gennemsnit  $28,6 \text{ mol N m}^{-2}$  og  $4,5 \text{ mol P m}^{-2}$  i 2013, før den blev oversvømmet (Tabel 1). To og et halvt år senere, i 2016, var imidlertid 17 % af TN og 8 % af TP forsvundet ved enten nedbrydning eller



Figur 3. Udsivning af næringsstoffer i form af opløst uorganisk kvælstof (DIN) og fosfor (DIP) fra den oversvømmede jordbund til vandfasen i Gyldensteen Kystlagune fra 2014 til 2017. Målinger blev udført i mørke fire gange om året. Røde søjler angiver den østlige og sorte søjler angiver den vestlige ende af lagunen. De stiplede linjer repræsenterer regressioner af alle målinger. Positive værdier angiver frigivelse fra jorden. Aksebetegnelse S står for sommer og V for vinter.

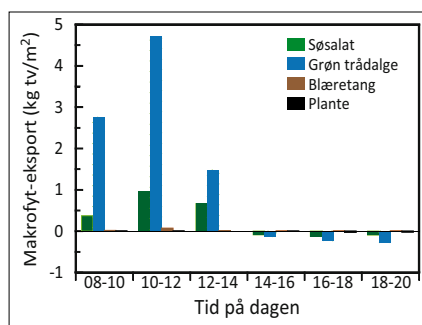


Figur 4. Koncentration af opløst uorganisk kvælstof (DIN) og fosfor (DIP) i vandfasen ved Gyldensteen Kystlagune fra 2014 til 2017. Hvert målepunkt er gennemsnit af tre månedlige prøvetagninger. Prøver blev taget i vest (sort), øst (rød) og ved den ydre rand (blå). Aksebetegnelse S står for sommer og V for vinter.

ophvirvling og eksporteret ud af kystlagunen med tidevandet. Tabet af TN og TP i hele kystlagunen (214 ha) over den 2,5-årige periode var på henholdsvis 144 og 25 tons svarende til et årligt gennemsnit på omkring 58 og 10 tons. Jorden forblev relativt beriget med N og P i hele perioden fra 2013 til 2017 med et N:P mol-forhold på omkring 6:1, hvilket er lavere

end normalt målt i f.eks skovjord /4/, sammenlignelig opdyrket jord /5/ og noget lavere end det typiske Redfield-forhold (16:1) i marine områder. Berigelsen i forhold til udyrket jord skyldes sandsynligvis mange års gødskning, da jorden blev intensivt dyrket. Det relative tab af N fra 2013 til 2016 var således dobbelt så højt som P. Der synes derfor i starten,

at være en meget let nedbrydelig og eroderbar organisk pulje koblet til en tilgængelig pulje af N og en langsomt tilgængelig pulje af P. Puljen af tilgængelig N vil derfor, som beskrevet ovenfor, blive hurtigere udtømt end puljen af P, som tilsyneladende vil udgøre en kontinueret kilde til vækst af blågrønalger i årene fremover.



Figur 5. Eksempel på tidevandseksporth af makrofyter ved den ydre rand af Gyldensteen Kystlagune. Eksporten er målt midt i august 2014. Tidevandet er udadgående fra kl. 8 til 14 og indadgående fra kl. 14 til 20. Værdier er angivet for to-timers perioder.

Tabel 1. Udviklingen i total-kvælstof (TN) og -fosfor (TP) fra 2013 til 2016 i de øverste 20 cm af jorden på 4-6 lokaliteter i Gyldensteen Kystlagune. Værdier er angivet arealspecifik (mol m<sup>-2</sup>) og for hele den 214 ha kystlagune (ton). TN:TP-forholdet (mol) er angivet for puljer og for tabet.

	2013.09.15	2014.11.01	2015.06.01	2016.05.10
<b>Total kvælstof (TN)</b>				
Pr. areal (mol m <sup>-2</sup> )	28.56	27.36	25.41	23.74
Hele område (ton)	855.5	819.7	761.3	711.3
<b>TN tab (ton)</b>	-	<b>35.8</b>	<b>94.2</b>	<b>144.2</b>
<b>Total fosfor (TP)</b>				
Pr. areal (mol m <sup>-2</sup> )	4.47	4.34	4.16	4.09
Hele område (ton)	296.3	288.1	276.0	271.2
<b>TP tab (ton)</b>	-	<b>8.2</b>	<b>20.3</b>	<b>25.1</b>
<b>TN:TP jordpulje</b>	<b>6,4:1</b>	<b>6,3:1</b>	<b>6,1:1</b>	<b>5,8:1</b>
<b>TN:TP tab</b>	-	<b>9,7:1</b>	<b>10,3:1</b>	<b>12,7:1</b>

**Tabel 2. Total eksport af total-kvælstof (TN) og -fosfor (TP) over den ydre rand ved Gyldensteen Kystlagune for perioden 2014 til 2016. TN:TP-forholdet (mol) af eksporten er angivet.**

	2014	2015	2016
TN eksport (ton)	65,9	26,4	9,5
TP eksport (ton)	14,1	6,6	5,8
TN:TP eksport	10,3	8,9	3,6

### Modelscenarier og tab af N og P fra Gyldensteen Kystlagune i løbet af de første 3 år

En kombineret hydrodynamisk og transport-dispersionsmodel (Mike 21) blev opstillet til beregning af N og P massebalancen ved den ydre rand. Lokale vandstandsdata fra DMI blev anvendt til beskrivelse af hydrodynamikken, mens ovenstående tidlige data for opløste og partikulære N og P puljer i vandet fra kystlagunen og den ydre rand blev brugt til at simulere import og eksport af DIN og DIP, samt partikulært materiale (makrofyter og SPM). Massebalancerne viser at kystlagunen i 2014 eksporterede 65,9 ton N (Tabel 2), hvoraf den makrofytbundne N-transport udgjorde 21,3 ton N, kvælstofnæringssaltene 31,9, mens SPM-N eksporten var 12,7 ton N (Fig. 6). Eksporten var allerede i 2015 reduceret til 26,4 ton N, idet eksporten af både makrofytbundet N og DIN var meget lavere. Tendensen til faldende N eksport fortsatte i 2016, hvor den kun var 9,5 ton N. P-eksporten

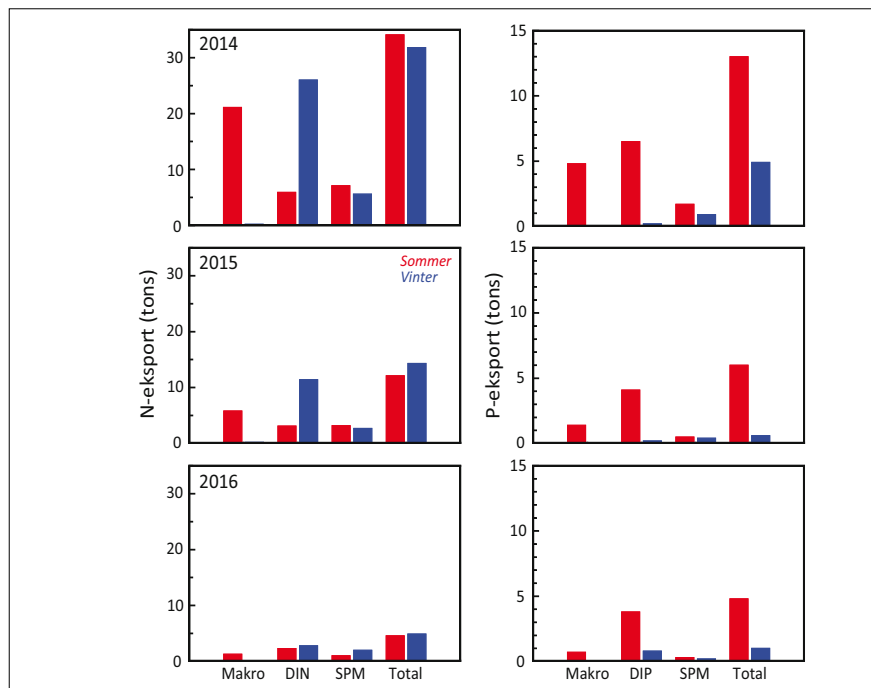
udviste et helt andet mønster, idet eksporten på 14,1 ton P i 2014 kun faldt til 6,6 ton P i 2015 og 5,8 ton P i 2016 (Fig. 6). De modelbaserede massebalancer stemmer fint overens med målinger af tabet i N og P fra den oversvømmede jord (Tabel 1), hvilket understøtter validiteten af resultaterne. Med andre ord, jordbunden i kystlagunen lækkede meget N lige efter oversvømmelsen i 2014 (320 kg N ha<sup>-1</sup>), dette faldt dramatisk med 86 % over de næste to år (46 kg N ha<sup>-1</sup> i 2016). Til gengæld var faldet i P udsivning fra 2014 (68 kg P ha<sup>-1</sup>) til 2016 (28 kg P ha<sup>-1</sup>) kun på 59 %.

### Fordele og ulemper ved "managed realignment"

Den store næringsstofeksport fra Gyldensteen Kystlagune efter "managed realignment" bør give stof til eftertanke i forhold til, hvor og hvordan man skal realisere tilsvarende genetablering af indvundet landbrugsjord til den oprindelige marine tilstand. Der rejser sig nogle åbne spørgsmål. Hvad betyder N og P udledningen fra det oversvømmede område til omgivende marine områder i forhold til andre kilder? Har placeringen af området – ud mod åbent hav eller inde i en fjord – betydning for konsekvenserne? Vil belastningen aftage hurtigt, så effekten på langt sigt vil være ubetydelig? Vi vil lade svarende på disse spørgsmål være op til læseren, men det kan i visse tilfælde være bekymrende med så høje belastninger af det omgivende havmiljø, som vi har målt de første år efter oversvømmelsen

ved Gyldensteen Strand. Udføres der "managed realignment" i lukkede fjordområder i f.eks. Limfjorden eller Mariager Fjord, som i forvejen er meget næringsstofbelastede og i en kritisk tilstand, vil tilstanden kunne forværres og give yderligere problemer med at opfylde Vandrammedirektivets krav. Der er selvfølgelig store fordele ved "managed realignment", som den er udført ved Gyldensteen. Det giver blandt andet forbedret kystbeskyttelse ved stigende havniveau, nye værdifulde naturområder med stor rekreativ værdi, og betydelig tilbageholdelse af drivhusgasser /6/. Det må derfor være beslutningstageres vurdering i hvert enkelt tilfælde hvordan balancen mellem fordele og ulemper ved "managed realignment" værdisættes. Under alle omstændigheder bliver vi nødt til at tage store beslutninger vedrørende kysterne, så vi kan beskytte os mod de kommende årtiers klimabetingede stigninger i havspejlet. "Managed realignment" kan i mange tilfælde vise sig at være et værdifuldt virkemiddel i den henseende.

SDU's intensive måleprogram ved Gyldensteen Kystlagune fortsætter frem til 2022 med støtte fra AVJN. Vi forventer, at puljerne af N og P i jorden vil udtømmes yderligere i årene fremover, og føre til mindsket eksport til det omgivende havmiljø. Det lavere niveau af N og P inde i kystlagunen vil sandsynligvis give en robust naturudvikling, hvor alle funktionelle makrofyter og bunddyr indfinder sig og sikrer en god økologisk balance i fremtiden.



**Figur 6. Eksport af N og P over den ydre rand om sommeren (rød) og vinteren (blå) ved Gyldensteen Kystlagune i perioden 2014 til 2016. "Makro" repræsenterer makrofyter, "DIN" og "DIP" repræsenterer opløst uorganisk N og P, "SPM" repræsenterer N og P i suspenderet partikulært materiale og "total" repræsenterer summen af alt N og P.**

### Referencer

- /1/ IPCC 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report.
- /2/ Hansen, K. 2008. Det Tabte Land – Den store fortælling om magten over det danske landskab. Gads Forlag.
- /3/ Hansen, K. 2014. Folk & Fortællinger fra det Tabte Land, Bind 2: Øerne. Forlaget Bæredygtighed.
- /4/ Vesterdal, L., Dalsgaard, M., Felby, C., Raulund-Rasmussen, K., Jørgensen, B.B. 1995. Effects of thinning and soil properties on accumulation of carbon, nitrogen and phosphorus in the forest floor of Norway spruce stands. Forest Ecology and Management 77: 1-10.
- /5/ Heyburn, J., McKenzie, P., Crawley, M.J., Fornara, D.A. 2017. Effects of grassland management on plant C:N:P stoichiometry: implications for soil element cycling and storage. Ecosphere 8: e01963, DOI: 10.1002/ecs2.1963.
- /6/ Kristensen, E., Flindt, M.R., Thorsen, S.W., Holmer, M., Valdemarsen, T. 2016. Gyldensteen Strand – fra agerland til kystlagune. Vand & Jord 23,1: 36-40.