

---

# Fysisk design af nye søer kan reducere fosforpuljen og tilgodese biodiversiteten

---

Nye søer risikerer at få en dårlig økologisk kvalitet med næringsrigt, uklart vand, fordi de sædvanligvis etableres på næringsrige landbrugsjorde. Næringsfrigivelsen fra søbunden til vandet kan imidlertid i nogle tilfælde mindskes ved det rigtige fysiske design. Fosforfjernelsen fra nye søer kan sandsynligvis optimeres ved indledningsvis at opretholde en lav vandstand med maksimal vindpåvirkning af søbunden og kan kombineres med planlagt lokalisering af områder med høj sedimentation og mulighed for sedimentopsamling.

---

JONAS STAGE SØ, KAJ SAND-JENSEN  
& THEIS KRAGH

---

## En tørlagt sø genopstår

Birkesø blev tørlagt helt tilbage i 1761 med henblik på landbrugsmæssige udnyttelse af jorden /1/. Den blev genetableret 250 år senere i december 2017 med et areal på 125 hektar og tre små fugleøer. Birkesø er meget lavvandet med en middeldybde på blot 0,54–0,58 m og en største dybde på 1,54–1,75 m i 2018–2019 (Figur 1). Den får det meste vand fra den næringsrige Tofte Sø og modtager tillige mange næringsstoffer fra tætte bestande af ænder, gæs og svaner, hvilket bidrager til, at søen er meget næringsrig og kan udvikle mange alger og uklart vand. Imidlertid er det muligt, at næringsfrigivelsen fra den oversvømmede næringsrige landbrugsjord kan mindskes, hvis frigjorte opløste og opslemmede partikelbundne næringsstoffer udvaskes fra søen eller fine, organiske sedimentpartikler omlægges af vind og bølger og flyttes fra eksponerede til beskyttede steder på dybt vand eller overlejres af sand med mindre næringsfrigivelse til følge. Derfor besluttede vi at analysere jorden for fosfor og organisk stof umiddelbart før søen blev etableret og vi gentog analyserne 116 og 530 dage efter søen blev genetableret med henblik på at følge udviklingen i de mineralske og

organiske sedimenters fordeling i søen samt det samlede fosforindhold i de øverste 10 cm af sedimentet, som især forventes at udveksle fosfor med vandet.

## Sedimentets hårdhed kortlægges med sonar

Det er et sisyfosarbejde at kortlægge sedimentets karakter og fosforindhold over en heterogen søbund på 125 hektar ved udelukkende at udtage sedimentprøver og analysere dem kemisk. Udfordringen kalder på kreative løsninger – svaret hedder sonar til måling af sedimentets hårdhed (densitet) og opfølgende fosformålinger ved karakteristiske sedimenthårdheder. Vi har scannet vanddybden og sedimentets hårdhed med en rumlig opløsning på 1 m ved at sejle i parallelle baner på tværs af søen under nøje GPS-positionskontrol /2/. Sedimentets hårdhed har vi derefter opdelt i klasser, som dels karakteriseres ved kemiske målinger af indholdet af organisk stof og fosfor i de øverste 10 cm af de udtagne sedimentprøver indenfor klasserne, dels har en målbar arealmæssig udstrækning kortlagt ved sonar scanningen. Derfor kan overfladesedimentets fosforindhold over hele søbunden estimeres og summeres.

Fordelingen af sedimentets hårdhed ud over søbunden ændrer sig over tid, hvis der sker omlægninger. Sådanne omlægninger forventes at være styret af vandstrømmens påvirkning af bunden udtrykt ved forskydnings-

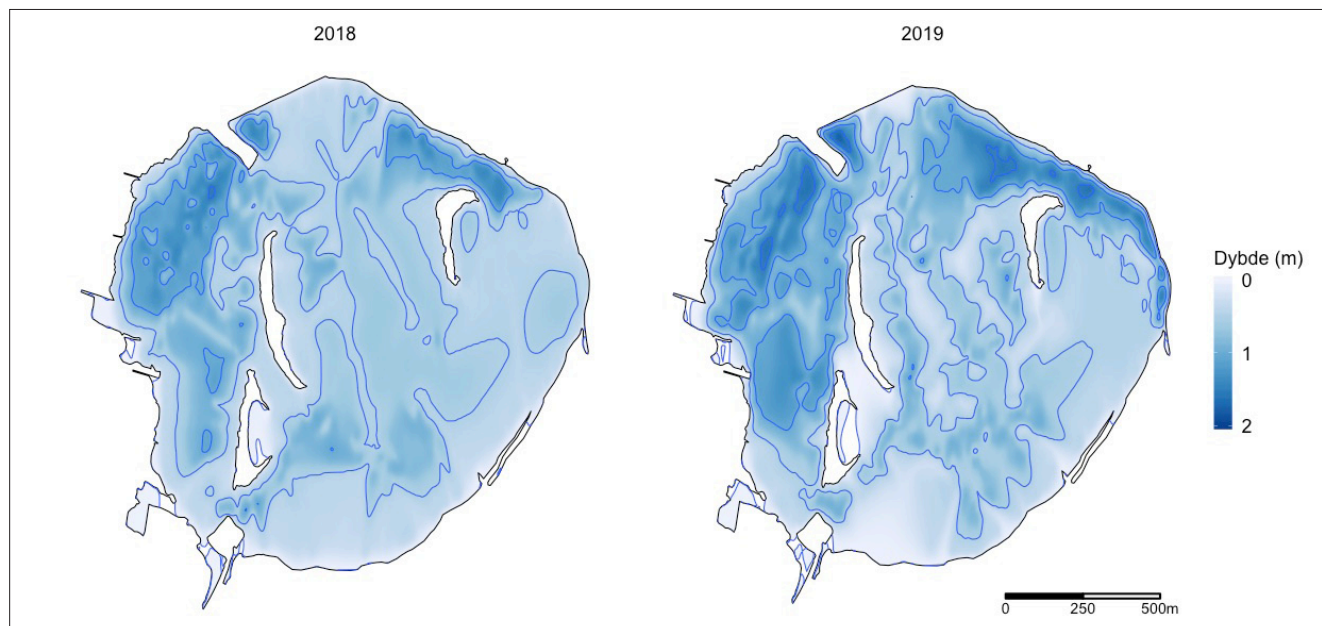
spændingen, såkaldt shear stress. Vi har derfor beregnet shear stress i punkter ud over hele søbunden ud fra en tilgængelig model /3/, hvori indgår den daglige maksimale vindhastighed målt 2 m over jorden, den gennemsnitlige daglige vindretning og fetch (den uhindrede afstand vinden kan rejse over vand frem til målepunktet) samt vanddybden. Vinddata stammer fra tre målestationer tæt på søen.

## Shear stress og omlægning af sedimentet

Birkesø er middelstor, men så lavvandet, at bølgerne udløser betydelig shear stress på bunden. Sediment shear stress er lavest på læsiden på vestlige søbred og bag fugleøerne, mens shear stress er højest midt i søen ved høj fetch og ved lave dybder tæt på søbredderne mod øst (Figur 2).

Shear stress skaber omlægning af sedimentet. Sedimentets hårdhed ændrede sig således markant fra april 2018 til maj 2019 som følge af mobilisering og flytning af sedimentpartikler (Figur 3). Sedimentet blev hårdere og med tungere mineralsk materiale (især sand) midt i søen, mens områderne ved bredden i læ for vinden fra nord, nordvest og nordøst udviklede en blødere bund med mere organisk stof. Dybe områder i søbunden efterladt af tidligere kanaler fik også en blød bund. Dette mønster svarer til fordelingen af shear stress.

Fra den første til den anden kortlægning af



Figur 1. Sødybde i 2018 (venstre) og 2019 (højre). Hvide områder i midten indikerer øer.

bunden udvikle bundens hårdhed sig således i stigende grad i overensstemmelse med shear stress, så den lineære sammenhæng mellem shear stress og bundens hårdhed blev statistisk stærkere (første periode:  $P < 0,01$ , anden periode:  $P < 0,001$ ) og forklaringskraften højere (første periode:  $R^2 = 0,12$ , anden periode:  $R^2 = 0,59$ ) hvilket betyder, at variationen i shear stress kan forklare henholdsvis 12 % og 59 % af variationen i bundens hårdhed i den første og den anden periode.

### Fosforindholdet

Fosforindholdet faldt i alle sedimentdybder efter søens etablering (Figur 4). Den samlede fosforpulje i de øverste 10 cm i hele søen faldt derfor også over tid. Faldet var højest i de første 116 dage af søens eksistens i 2017–2018 ( $20,1 \text{ mg P m}^{-2} \text{ dag}^{-1}$ ) og lavere i de efterfølgende 414 dage i 2018–2019 ( $7,9 \text{ mg P m}^{-2} \text{ dag}^{-1}$ ). Samlet forsvandt 69% af fosforpulje fra de øverste 10 cm af sedimentet over de 530 dage. Det betyder ikke nødvendigvis, at hele denne pulje er eksporteret fra søen. En del kan også være blevet begravet dybere end 10 cm på steder med kraftig sedimentation eller blevet overlejret af sand. Men sedimentlag dybere end 10 cm deltager kun i begrænset omfang i udvekslingen med søvandet, så sedimentets fosforfrigivelsen er sandsynligvis reduceret markant.

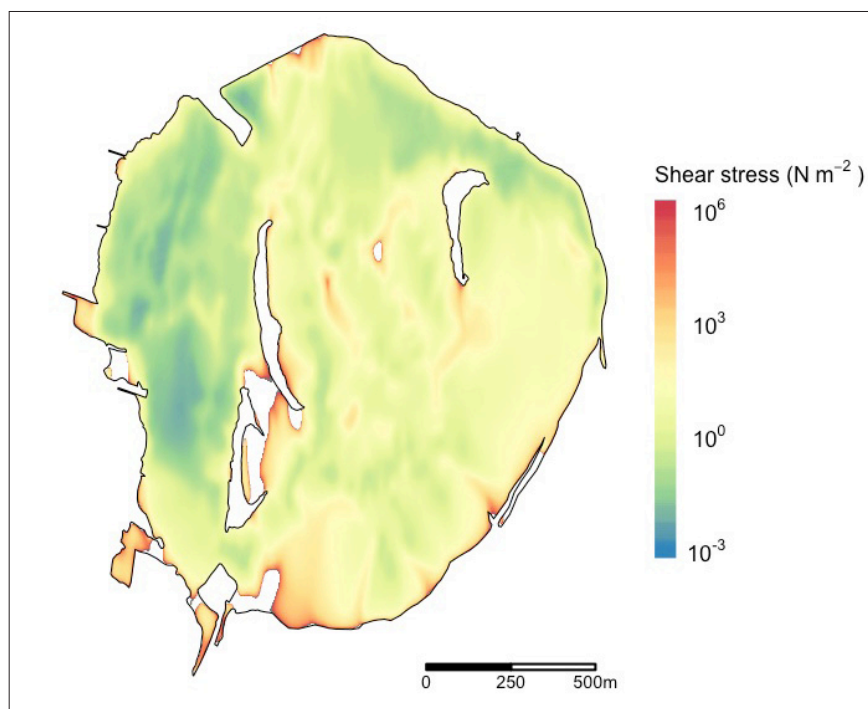
### Fosfortab ved planlagte vanddybder og vandudskiftning

Birkesø oplever, som data viser, omfattende omløjring af sedimentet og ændringer i bundens hårdhed styret af shear stress som følge af vandstrømmens kraftpåvirkning af bunden.

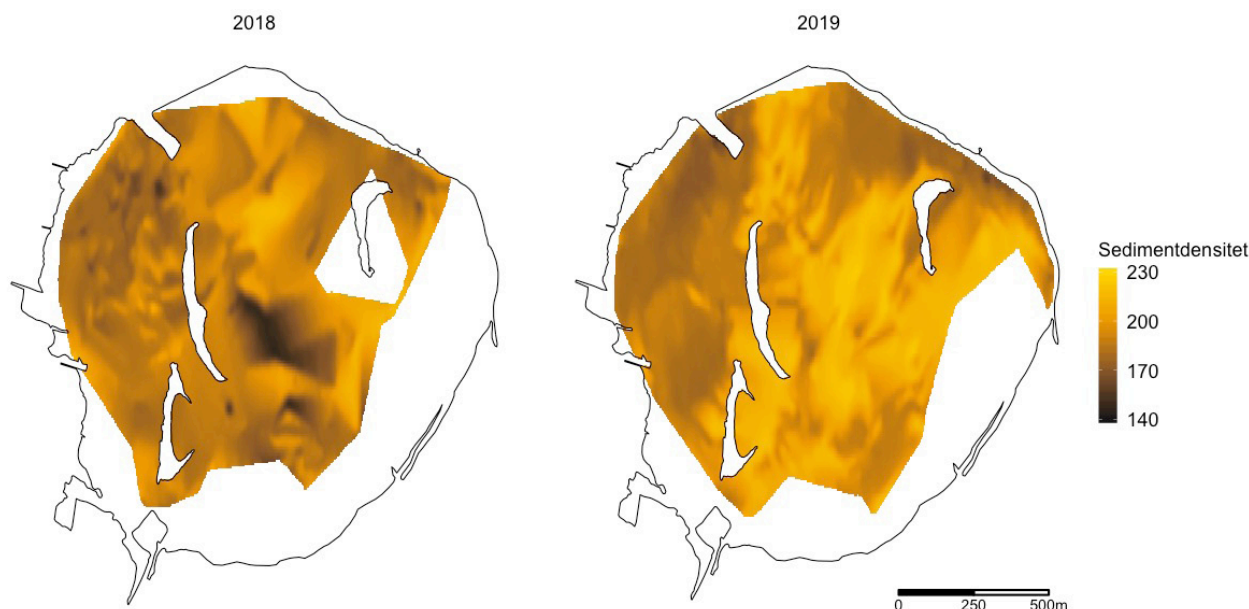
Vi har tidligere påvist omfattende omløjring af sedimentet ved etablering af den nye Filsø, som er meget stor, også ganske lavvandet (middel 1,05 m) og ligger vindeksponeret nær Jyllands vestkyst /2/. Birkesø er meget mindre og ligger mindre vindeksponeret tæt på Jyllands østkyst. Men søen er alligevel tilstrækkelig lavvandet og vindeksponeret til, at omfattende sedimentomløjring fandt sted.

Vi har vist, at det er muligt at beregne shear stress ud fra vindens hastighed, retning og fetch over søen samt vanddybden på det givne

punkt og dermed udviklingen af sedimentets hårdhed og det tilknyttede indhold af organisk stof og fosfor. Disse sammenhænge kan udnyttes på forhånd ved anlæggelse af enhver ny sø. Det er således muligt at planlægge, hvor der skal udvikles en hård bund og passende vanddybde med mulighed for badning og opvækst af vandplanter, og omvendt, hvor man vil have et dybere område med blød bund og sedimentation af næringsrige organiske partikler. Man kan endog planlægge lokalisering af et sedimentationsbassin eksempelvis tæt på søens vestlige bred med mulighed for



Figur 2. Beregnet middelforskydningskraft (shear stress) ud over søbunden fra april 2018 til maj 2019. Hvide områder indikerer øer og lavvandede områder ( $< 0,2 \text{ m}$ ), der ikke kunne måles med sonar og måtte betragtes som land.



Figur 3. Søs sedimentets densitet i 2018 (venstre) og 2019 (højre). Lysere farver indikerer hårdere sediment, mens mørkere farver indikerer blødere sediment. Hvide områder indikerer øer eller for lavvandede områder til måling (< 0,2 m). Søbreddens beliggenhed i 2018 blev brugt som baggrund for begge kort.

oprensning med maskinkraft fra land. Alternativt kan man vælge at anlægge et dybt centralt sedimentationsbassin, som ligger under sommerens temperaturspringlag og ophober næringsstoffer over tid.

Sedimentet i de øverste 10 cm i Birkesø tabte store mængder af fosfor over de første 530 dage efter søens genetablering, i lighed med udviklingen i Filsø /2/. Man ved, at der sker et hurtigt indledende tab af uorganisk fosfor, når næringsrige jorde sættes under vand /4/. Vanddækkede sedimenter bliver også gennemgående iltfrie, hvorved iltede jern- og manganforbindelser reduceres, opløses og frigør bundet fosfor på uorganisk form /5/. I tillæg sker et stort tab af fosfor ved nedbrydning af organisk stof – et tab, som forstærkes, når organiske sedimentpartikler opvirlvles i søvandet og enten nedbrydes her,

eksporteres fra søen eller sedimenteres på ny. Eksporten ud af søen bliver selvfølgelig størst ved en passende lav vanddybde og hurtig udskiftning af søvandet. Hvis udløbet ligger eksponeret for vinden kan vandets partikkelkoncentration og dermed partikeltabet fra søen blive særlig stort. Udskiftes søvandet langsomt er deponering af næringsrige partikler på dybt vand en anden måde at reducere den interne belastning på. Denne mulighed har man, os bekendt, ikke undersøgt eller udnyttet i de nye søer.

#### Fosforbinding i jorden før oversvømmelse

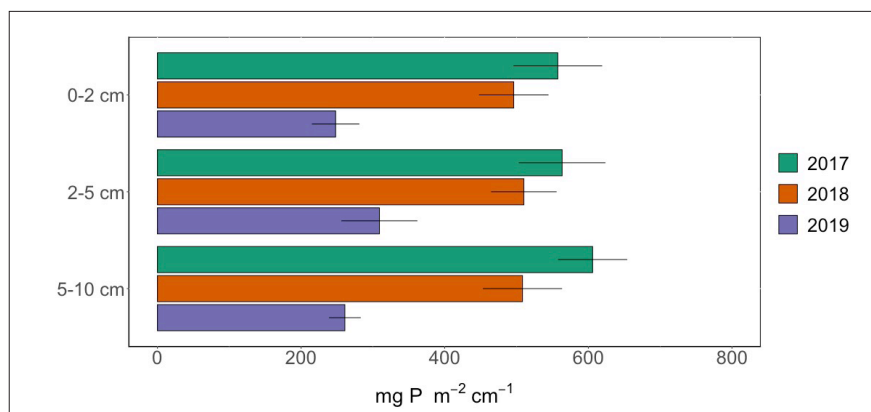
Store fosfortab fra nye søer via udløbet kan være uacceptable af hensyn til følsomme vandområder, som ligger nedstrøms. Så må man overveje at rense afløbsvandet, eller benytte

alternative metoder for at mindske sedimentets næringsfrigivelse og forbedre søernes økologiske kvalitet. Forbehandling af jordene før oversvømmelse er en sådan måde at reducere sedimentets frigivelse på, som vi har undersøgt i projektet. Laboratorieforsøg med jordsøjler udtaget før etablering af Rønnebæk Sø viste, at sandpålejring og dybdepløjning (som begraver det næringsrige, organiske materiale på stor sedimentdybde) kan være billige og effektive måder at fjerne fosforfrigivelsen og endog sikre en fosforoptagelse ved vanddække /4/. Tilsætning af jern til sedimentet førte også til fosforoptagelse /4/.

Hvis denne forbehandling af dyrkningsjordene kan skabe klart vand, har vandplanter mulighed for at etablere sig og yderligere forbedre søens økologiske kvalitet /6/. Vandplanterne kan dels øge vandets klarhed og dels skabe refugier og habitater for zooplankton, smådyr og fisk /6/.

#### Fugletætheder og fugleøer

Fuglene fortjener en særlig overvejelse, fordi deres bestande afhænger meget af søbundens karakter på lavt vand. Fuglene følger ikke nødvendigvis søernes vandkvalitet. De er først og fremmest afhængige af fødeudbuddet. Især vadefuglenes tilstedeværelse begunstiges af sjapvand over en organisk bund med mange smådyr. Birkesø var usædvanlig rig på fugle i sit første meget næringsrige år uden fisk som fødekonkurrenter til fuglene. Den gennemsnitlige artsrigdom af fuglearter varierede mellem 11 og 57 over sæsonerne og antal individer svingede fra astronomiske 6.000



Figur 4. Middelfosforindhold (x, mg P per kvadratmeter per cm i de forskellige sedimentstrata, y) i 2017 før søen blev genetableret og i 2018 og 2019 efter genetableringen. Bjælkerne indikerer standardfejlen omkring middelværdien. Fosforindholdet aftog signifikant i alle sedimentlag fra 2018 til 2019.



Foto 1. Allerede kort efter genetableringen af Birkesø var fugle diversiteten og abundansen særdeles høj. Foto J. C. Schou.

om vinteren og foråret til 13.500 om efteråret med de mange trækfugle. Disse antal svarer til omkring 50–100 individer per hektar af søens overflade. Til sammenligning var fugletætheden omkring ti gange lavere per hektar (sommer: 0,8–3,0; efterår-vinter omkring 4,0 individer per hektar) i komplekset af gamle naturlige Maribo-søer, som betragtes som ganske fuglerige.

Øerne i Birkesø blev anlagt for at skabe rævefri områder for jordrugende fugle, omend æg og unger ikke er i sikkerhed for hverken rovfugle, mårhund eller odder. Bredderne omkring øerne er imidlertid ikke optimale for vadefuglene, da jorden til øerne blev gravet op lige omkring øerne. Det skabte render, som er for dybe til at vadefuglene kan bunde. Med tiden vil bølgebevægelsen grave renderne omkring øerne endnu dybere. Lave dybder omkring øerne må derfor efterstræbes af hensyn til fuglene og vil også dæmpe bølgerne og modvirke erosionen af søbredderne over tid. Tilsvarende vil lavvandede områder tæt på land dæmpe bølgerne og beskytte bredderne mod erosion /7/ og dermed fastholde sjøvand for vadefuglene. Tilstedeværelse af vige

og beskyttede laguner langs bredderne fremmer også fuglelivet. Det er således muligt, efter omhyggelige overvejelser, at tilgodese såvel vandkvaliteten som biodiversiteten af planter og fugle, når dybdeforhold og eventuelle øer skal planlægges i nye søer

Godt fysisk design er en afgørende forudsætning for høj økologisk kvalitet og biodiversitet, som man har mulighed for at planlægge bedre ved etablering af nye søer i fremtiden.

### Referencer

- /1/ Hansen, K., Folk & Fortællinger fra Det Tabte Land, bind 1: Jylland. 2011.
- /2/ Kragh, T., Sand-Jensen K., Petersen K., and Kristensen E., Fast phosphorus loss by sediment resuspension in a re-established shallow lake on former agricultural fields. *Ecological Engineering*, 2017. 108: p. 2-9.
- /3/ Rohweder, J., Rogala J.T., Johnson B.L., Anderson D., Clark S., Chamberlin F., Potter D., and Runyon K., Application of wind fetch and wave models for habitat rehabilitation and enhancement projects – 2012 update. Contract report prepared for U.S. Army corps of engineers' upper mississippi river restoration. *Journal*, 2012. Volume(Issue): p. Pages.
- /4/ Kolath, T., Reuss L., Egemose S., and Reitzel K.,

Reduction of Internal Phosphorus Load in New Lakes by Pretreatment of the Former Agricultural Soil—Methods, Ecological Results and Costs. *Sustainability*, 2020. 12(9): p. 3575.

- /5/ Hupfer, M. and Lewandowski J., Oxygen Controls the Phosphorus Release from Lake Sediments – a Long-Lasting Paradigm in Limnology. *International Review of Hydrobiology*, 2008. 93(4-5): p. 415-432.
- /6/ Jeppesen, E., Lauridsen T.L., Kairesalo T., and Perrow M.R., Impact of submerged macrophytes on fish-zooplankton interactions in lakes. *Structuring Role of Submerged Macrophytes in Lakes*, 1998. 131: p. 91-114.
- /7/ Skafel, M.G. and Bishop C.T., Flume experiments on the erosion of till shores by waves. *Coastal Engineering*, 1994. 23(3): p. 329-348.

JONAS STAGE SO (jonassoe@biology.sdu.dk) og THEIS KRAGH er fra Biologisk Institut, Syddansk Universitet. KAJ SAND-JENSEN er fra Ferskvands Biologisk Laboratorium, Københavns Universitet.

Undersøgelsen er udført på Ferskvandsbiologisk Laboratorium, Københavns Universitet med støtte fra Aage V. Jensen Naturfond.