

# Temperaturdynamik i små søer

## – daglig lagdeling og opblanding

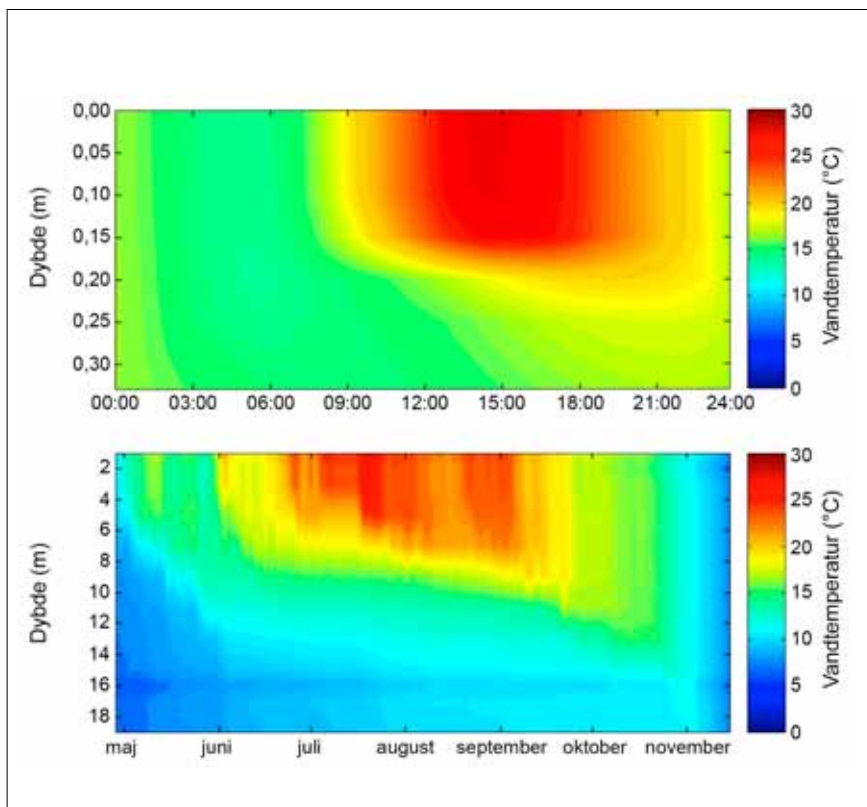
Der eksisterer hundrede tusinde søer mindre end 1 ha i Danmark og mange millioner alene i Nordeuropa. Sammenlignet med større søer er de sparsomt undersøgt, selv om miljøet er meget dynamisk og diversiteten af alger, planter og dyr er høj og rummer mange specielle arter. Det specielle fremmes blandt andet af vandtemperaturen, som varierer voldsomt over døgnet, over året og mod dybden. Faktisk modsvarer temperaturvariationen i et enkelt sommerdøgn i en lille sø, variationen fra forår til efterår i en stor sø. Udfordringen og mulighederne for organismerne er store.

KENNETH THORØ MARTINSEN, MIKKEL  
RENÉ ANDERSEN, THEIS KRAGH &  
KAJ SAND-JENSEN

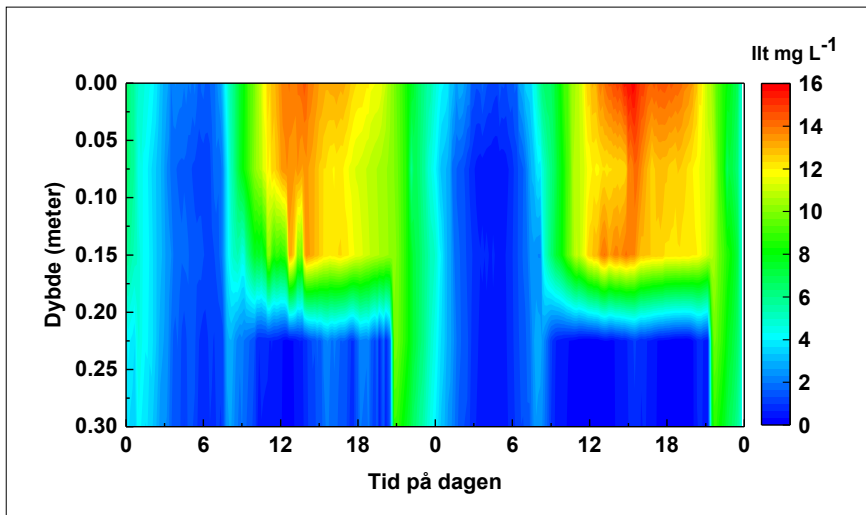
### Temperatur er nøglen

Temperaturen er en nøgleparameter i al økologi. Den styrer kemiske og biologiske processer og dermed stofcirkulationen samt arternes tilstedeværelse og adfærd. Derfor er det mærkeligt, at man ofte har undladt at studere temperaturen i små søer, som både varierer mere i tid og rum og udviser større ekstremer end i store søer.

Små søer tilbyder således bedre muligheder for at afsløre arternes positive eller negative reaktioner på store daglige variationer og høje maksimale temperaturer end større søer. De små søer bliver hurtigt varme om foråret og udvikler markant højere maksimale temperaturer (ofte  $> 30\text{ °C}$ ) end store søer, så arter i små søer kan forventes at være under mere intensiv påvirkning og selektion. Sydlige arter under spredning mod nord i et stadigt varmere klima kan forventes først at dukke op i de små søer. De kan herved fungere som hot spots for arternes evolution og som trædesten



Figur 1. En lavvandet sø med tæt kransålgelvegetation har et temperaturforløb i løbet af et sommerdøgn (øverst), som ligner udviklingen i en dyb sø med permanent lagdeling fra forår til efterår (nederst). Efter Andersen (original).



Figur 2. Iltindhold med dybden i løbet af to dage i en 30 cm dyb sø (areal 1000 m<sup>2</sup>) med tæt kransnålalgevegetation. Søen lagdeler om dagen, men om natten optræder konvektiv opblanding. Bemærk at bundvandet bliver næsten iltfrit i dagtimerne, når søen lagdeler. Efter Andersen et al. (2017).

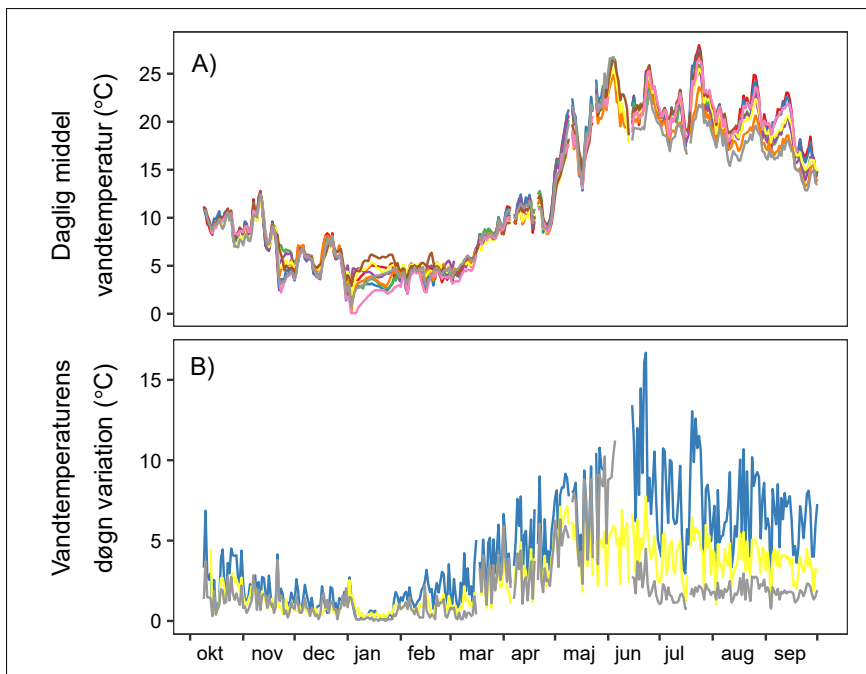
under arternes spredning. Små søer tilbyder derfor unikke muligheder for spændende studier.

### Daglig lagdeling og opblanding

Små lavvandede søers miljøforhold og biologi er ofte blevet undersøgt ved en enkelt indsamling. Dog har man til tider fulgt temperaturen tættere med maksimum-minimum termometre anbragt på lavt vand over ugeintervaller. Antagelsen har været, at de lavvandede

små søer var fuldt opblandede, så man fik en repræsentativ måling for hele søen ved målinger og indsamlinger på lavt vand.

Det fik man ikke. Tværtimod! Da vi anbragte automatisk registrerende sensorer for temperaturer, ilt, pH mv. i meget små søer med kransnålalger, afslørede de voldsomme dybde- og tidsændringer. Den største overraskelse var, at 30-60 cm dybe småsøer (0,1-0,3 ha), der lå frit eksponerede for vinden, udviklede en kraftig temperaturlagdeling om dagen



Figur 3. Overfladetemperatur i forskellige småsøer ved Næstved fra oktober 2015 til september 2016. A: den gennemsnitlige daglige temperatur har samme forløb i ni småsøer og følger lufttemperaturen. B: den daglige temperaturvariation (differensen mellem maksimum og minimum) er vist for tre søer med lav (blå), middel (gul) og større dybde (grå) for at tydeliggøre forskellene. Temperaturvariationen er størst om sommeren og falder med øget vanddybde.

med 10-15 grader højere overflade- end bundtemperaturer. Forklaringen er, at det lille areal begrænser vindens omrørende effekt, og de turbulente hvirvler i vandet dæmpes yderligere af den tætte vegetation. Derfor kan der opstå temperaturlagdeling i dagtimerne – kraftigst på solskinsdage med svag vind (Figur 1 øverst) – men fravær af lagdeling på gråvejrsdage med kraftig vind. Lagdelingen om dagen blev fulgt af konvektiv opblanding om aftenen og natten, når overfladevandet blev afkølet, tungere og dermed skabte effektive retningsbestemte strømme gennem vegetationen ned til bunden /1/.

### Temperaturen i den lille og store sø

Tætte plantebestande i småsøer har den dobbelte effekt, at de forstærker sollysets absorption og omdannelse til varme i de øverste 10-20 cm af vandsøjlen samtidig med, at de efterlader bundvandet i mørke og begrænser den turbulente opblanding af vandsøjlen. Derfor kan vi som nævnt opleve, at temperaturen om dagen når 30 grader ved overfladen, men blot 15 grader ved bunden på 40 cm's dybde. Om natten blandes vandsøjlen ved konvektion, og næste dag starter det hele forfra med lagdelingen.

I større søer dybere end 4 m opstår typisk et stabilt springlag, som varer fra forsommeren til efteråret (Figur 1 nederst). Overfladetemperaturen når måske 18-23 grader, mens bundtemperaturen typisk ligger på 8-15 grader. Sommerens 6-måneders lange lagdeling i den større sø er kogt ned til blot 12 lysetimer i lavvandede småsøer (Figur 1 øverst). I den større sø kan der således udvikles stabile forskelle i miljøet mellem overfladen og bunden over 6 måneder fra lagdelingen etableres i forsommeren til den forsvinder om efteråret, mens miljøforskellene udlignes efter blot 12 timer ved nattens opblanding i den lille lavvandede sø.

Lagdeling og opblanding er vigtige processer, da de ledsages af etablering og nedbrydning af fysiske og kemiske gradienter. Et eksempel på iltudviklingen i en lille vegetationrig sø er vist (Figur 2). I småsøer med tæt vegetation af kransnålalger absorberes al lyset i de øverste vandlag, og der opstår iltovermætning, mens bundvandet oplever iltsvind og ophobning af sulfid og ferrojern ved nedbrydning af organisk stof ved bunden. Udviklingen er den samme, som i bundvandet på flere meters dybde i den store sø. Næringsstoffer og uorganisk kulstof ophobes også i småsøers bundvand om dagen, men blandes op i hele vandsøjlen om natten, så stofferne er til rådighed for produktionen næste dag.

Den konvektive opblanding om natten i

små søer fungerer billedlig talt som en "pumpe" for substrater til næste dags plante-produktion. I den dybe sø derimod, er "pumpen" slukket i 6 måneder, hvor næringsstoffer og uorganisk kulstof er låst fast i bundvandet og dermed ikke kan bidrage til plante-produktionen i det belyste overfladelag /2/.

### Temperaturen i ni små søer

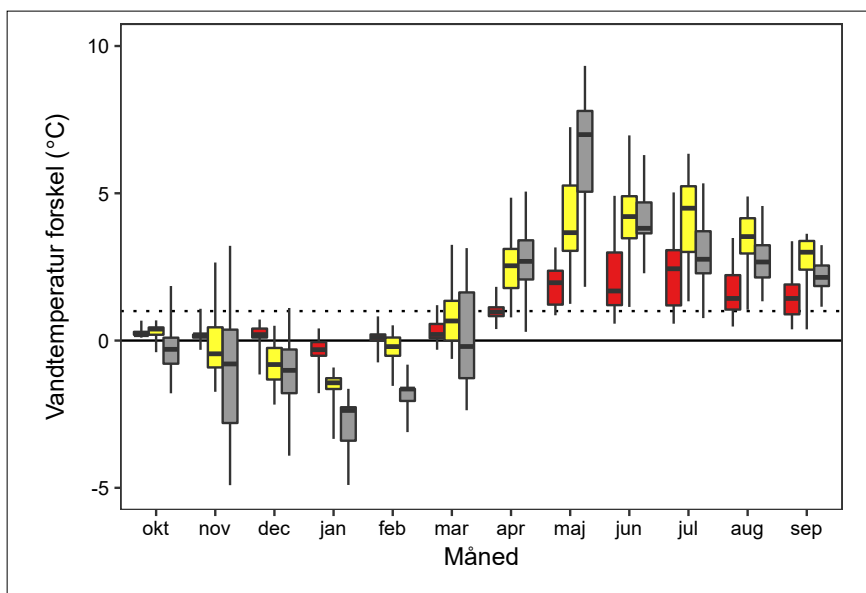
Da temperaturen og vekslende lagdeling og opblanding er så afgørende for søernes omsætning og organismernes livsbetingelser, har vi studeret forholdene nærmere i ni små søer med forskelligt areal (420 - 4300 m<sup>2</sup>) og dybde (0,3-2,3 m) i et åbent græsset område nær Næstved. Formålet har været at kunne forudsige temperaturdynamikken i løbet af året og den daglige lagdeling på baggrund af vejrforholdene og søernes areal og dybde. Alle søerne udviklede undervandsvegetation om sommeren, dog ikke så tæt en vegetation som i søer med kransnålgler.

Overfladetemperaturen undergik meget markante svingninger over dagen og året i små søerne (Figur 3). Mens den daglige gennemsnitstemperatur var tæt koblet til lufttemperaturen og kun udviste små forskelle mellem søerne (på nær i de mest lavvandede søer i perioder med pludseligt varmt eller koldt vejr), var de daglige temperatursvingninger meget forskellige. Svingningerne kan overstige 10-15 grader om sommeren i de lavvandede søer, mens de er markant mindre i dybere søer med høj varmekapacitet.

På trods af, at søerne var lavvandede, var de meget ofte lagdelte (Figur 4). Alle ni søer var på et tidspunkt lagdelte i årets løb. Mod forventning var lagdelingen ikke begrænset til varme sommerdage, men forekom fra marts til oktober, dog hyppigst i juni-juli. Samlet set var de ni søer lagdelte halvdelen af årets dage. Lagdeling defineres som mere end 1 grad højere overflade- end bundtemperatur. I 94 % af dagene forsvandt lagdelingen ved opblanding om natten, men i korte perioder strakte lagdelingen sig altså over flere dage i de dybeste søer.

### Model forudsiger lagdeling

En statistisk model viste at især meteorologiske forhold (øget indstråling og lufttemperatur, lavere vindhastighed), men også øget vanddybde øgede sandsynligheden for lagdeling af vandsøjlen. Indstrålingen havde den største påvirkning. Når indstråling af synligt lys oversteg cirka 250 μmol/m<sup>2</sup>/sek som gennemsnit for dagen, var sandsynligheden for lagdeling høj (Figur 5). Modellen kan udpege de dage, hvor mange små søers miljøforhold, stofomsætning og organismer kan forventes at



Figur 4. Den maksimale daglige temperaturforskel mellem overfladen og bunden opgjort måned for måned i en lavvandet sø (rød, 68 cm), lidt dybere sø (gul, 127 cm) og endnu dybere sø (grå, 169 cm). Søerne farvet med grå og gul er de samme som vist i Figur 3B. Månedresultatet er vist som bokse for 25-75 % af de daglige målinger, mens pindene viser maksimum og minimum. Den stiplede horisontale linje viser tærskelværdien på 1 °C for lagdeling. Bemærk, at søerne er varmere ved bunden end ved overfladen ved isdække om vinteren (negative værdier), og lagdelingen er kraftigst i maj, juni og juli.

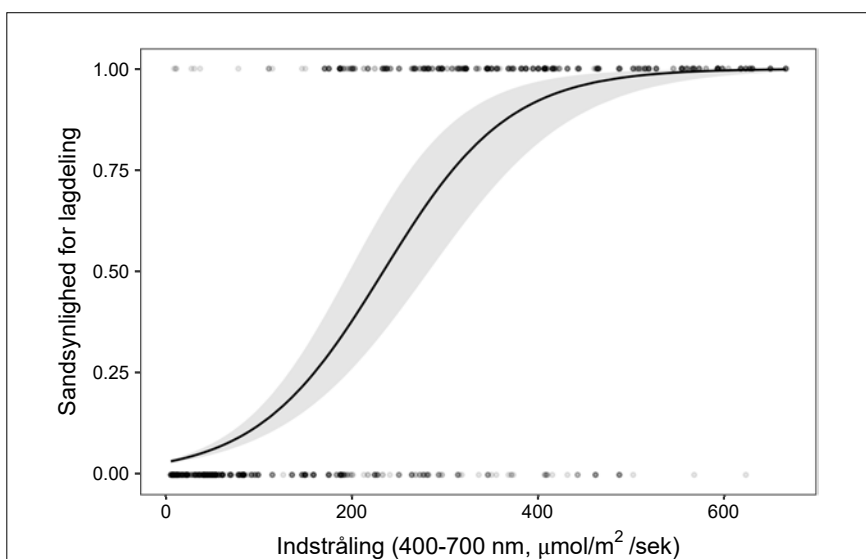
være påvirket af lagdeling. Om sommeren er det langt de fleste.

### Iltvind eller iltovermætning i bundvandet

I små søer med tætte bevoksninger af kransnålgler, når intet lys til bunden til at drive iltproduktionen, så her opstår iltvind i dagens løb, mens ny ilt tilføres fra overfladen ved natens omrøring (Figur 2). Det kræver særlige tilpasninger hos kransnålglerne at kunne tåle vekslende iltfrie og iltede forhold hver eneste døgn i sommerens løb.

I de ni små søer ved Næstved var vegetationen ikke så tæt, så her trængte noget lys til bunden til at drive fotosyntesens iltproduktion. Derfor opstod der ikke iltvind ved bunden i de ni søer i juni. Tværtimod var bundvandet overmættet med ilt i tre af dem.

Varierende temperatur- og iltforhold er en del af små søernes forskellighed fra overfladen til bunden og fra dag til dag. Forskelle i stofproduktion og nedbrydning ned gennem vandsøjlen skaber stejle gradienter i pH, CO<sub>2</sub>, sulfid, ferrojern og methan.



Figur 5. Sandsynligheden for temperaturlagdeling som funktion af daglig middel indstråling. Højere indstråling øger chancen for lagdeling. Punkterne er observationer, linjen angiver den bedste sammenhæng og det grå område viser 95 % sikkerhedsgrænser.

## Betydning for organismerne

Vandtemperaturen har stor betydning for smådyrenes aktivitet og livscyklus. Bevægelige dyr kan ved at flytte sig over ganske korte afstande opsøge de temperatur- og iltforhold, som bedst tilfredsstiller deres krav. Opstår der gunstige høje temperaturer om dagen nær vandoverfladen i småsøer med kransnålgær, kan de søge herop og samtidigt undslippe iltsvindtet ved bunden, mens de om natten kan æde på bunden med ilt til rådighed. Dafnier vandrer også op og ned i vandsøjlen efter forholdene, og visse arter kan endog tilpasse sig iltsvind ved at producere iltbindende hæmoglobin i kroppen. Myggelarver kan bevæge sig til det varmere lave vand nær bredden om dagen og retur om natten til det varmere dybere vand med god afstand fra bredden. Dermed kan de hurtigere udvikle sig til voksne myg og producere flere generationer /3/.

Betingelserne er barske for fiskene, men de kan selvfølgelig hurtigt svømme hen til om-

råder med de gunstigste miljøforhold. Det er dog ikke uden risiko, hvis de er tvunget til at opholde sig ved overfladen fuldt eksponerede til rovfisk og fiskespisende fugle. Karusser er almindelige i småsøer og hårdføre, så de bedre kan holde sig i skjul nær bunden, fordi de overlever iltsvind ved at slå over på forgæring uden ilt.

Under alle omstændigheder skaber de meget varierede miljøforhold markante forskelle i artssammensætningen i småsøer afhængig af arternes forskellige tolerance. Om samme art også kan udvikle forskelle i tolerance mellem bestande i nabosøer på grund af forskelle i kritiske miljøbetingelser, undersøger vi i øjeblikket.

Småsøerne ligger i stort antal derude og tilbyder muligheder for oplevelser og ny viden.

### Litteratur:

- /1/ Andersen, M. R., Sand-Jensen, K., Woolway, R. I., Jones, I. D. 2017: Profound daily vertical stratification

and mixing in a small, shallow, wind-exposed lake with submerged macrophytes. *Aquatic Sciences* 79, 395-406.

/2/ Martinsen, K. T., Andersen, M. R., Kragh, T., Sand-Jensen, K. 2017: High rates and close diel coupling of primary production and ecosystem respiration in small, oligotrophic lakes. *Aquatic Sciences* 79, 995-1007.

/3/ Iversen, T. M. 1971: The ecology of a mosquito population (*Aedes communis*) in a temporary pool in a Danish beech wood. *Archiv für Hydrobiologie* 69, 309-332.

KENNETH THORØ MARTINSEN er videnskabelig assistent, MIKKEL RENÉ ANDERSEN er Post. Doc., THEIS KRAGH er lektor og KAJ SAND-JENSEN er professor på Ferskvandsbiologisk Laboratorium, Københavns Universitet.

Vi takker COWIfonden og Carlsbergfondet for økonomisk støtte.



## Genopbygning af dansk fiskeri

Hvis al dansk fiskeri blev forvaltet bæredygtigt i løbet af de næste ti år, ville de samlede indtægter i fiskerisektoren stige med mindst 1.8 milliarder kroner, og i fiskeriindustrien alene vil der blive skabt 900 nye arbejdspladser, ifølge en ny undersøgelse foretaget af Oceana.

Ifølge rapporten er den sociale og økonomiske værdi af genopretning af fiskeriet aldrig før blevet beregnet på en så omfattende vis. Oceana's undersøgelse viser bl.a. at der vil

være følgende fordele ved bæredygtig forvaltning af fiskeriet i Danmark:

- Den samlede vægt af fisk der landes af den danske flåde, kan potentielt stige med mindst 642.000-ton om året (+74%).
- Den samlede omsætning i fiskerisektoren kan stige med mindst 1.8 milliarder kroner.
- Der kan skabes mindst 900 nye fuldtidsstillinger i fiskerisektoren samt yderligere 4.300 i tilknyttede brancher som f.eks. fødevarer og detailhandel.

Danmark har den højeste beskæftigelsesmultiplikator inden for fiskerisektoren blandt EU-landene. For hver stilling, der bliver oprettet i det direkte fiskeri i Danmark, vil der blive skabt 4,7 jobs i tilknyttede brancher.

Endvidere besidder Danmark ca. 44% (2.444 t i 2018) af den samlede kvote for den vestlige Østersøtorske (5.597 t samlet tilladt

fiskemængde (TAC) i 2018). Den potentielle stigning i fangster fra bestanden af den vestlige Østersøtorske kunne være tæt på 40.000 ton, hvis bestanden blev fisket bæredygtigt og genoprettet. Dette ville medføre en stigning på 17.600 t i fangsterne fra bestanden for Danmark alene, hvilket potentielt kan generere 238 millioner kroner.

Resultaterne af undersøgelsen kommer efter en aftale indgået af EUs Landbrugs- og Fiskeriministre om det kommende års fiskerikvoter for Østersøen. Kommissionen besluttede at fastsætte kvoten for den vestlige Østersøtorske på 5.597 t (samme kvote som 2017), hvilket overstiger de videnskabelige anbefalinger, og undergraver målet for den fælles fiskeripolitik om et bæredygtigt fiskeri inden 2020.