

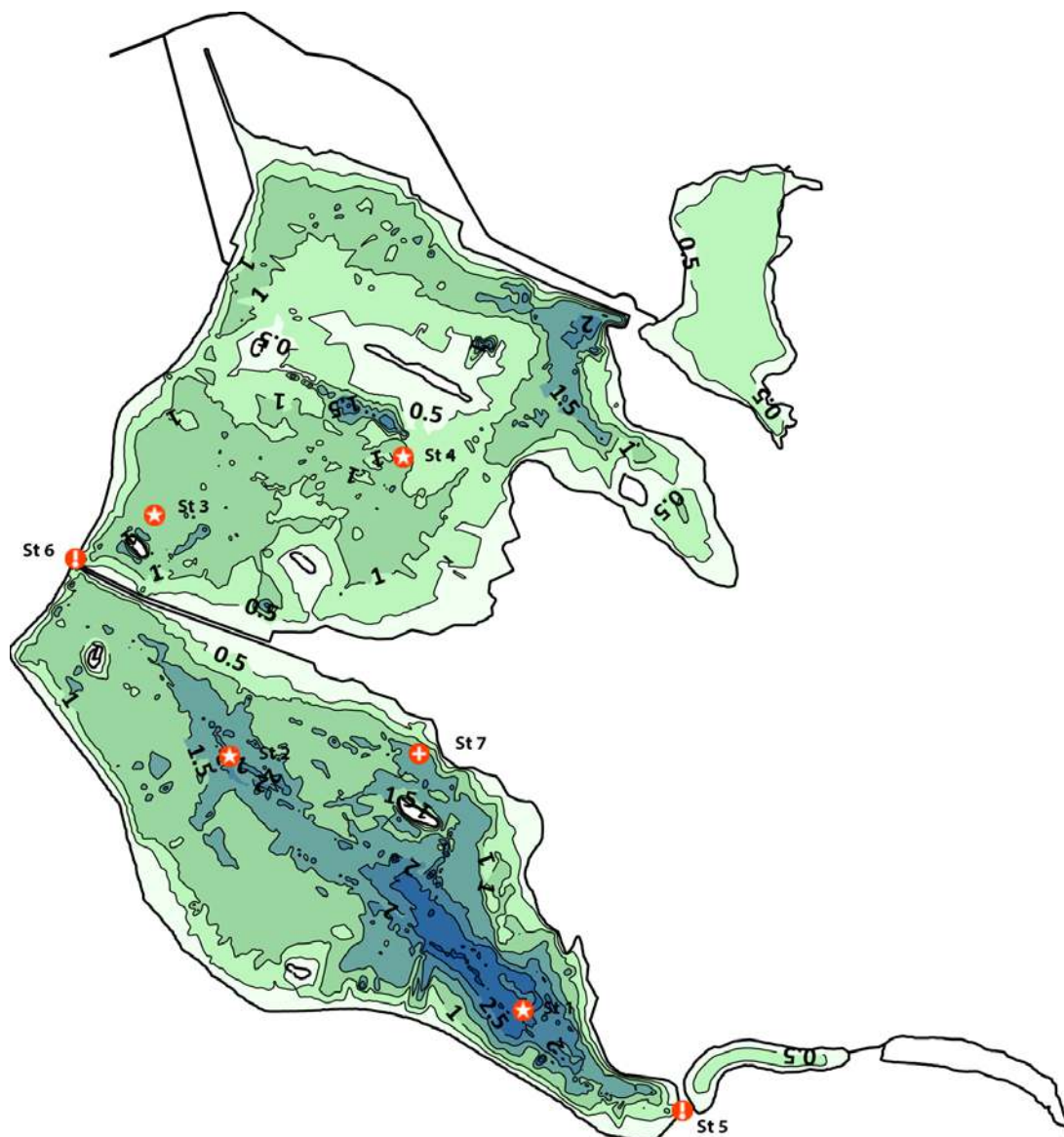
**Notat om iltsvindet i Filsø den 4. og 5. august 2018.**

**Lektor Theis Kragh, Ferskvandsbiologisk Laboratorium, Københavns Universitet**



Vi har udformet denne rapport på baggrund af automatiske målinger af temperatur og iltindhold på to stationer i Søndersø samt vandhøjden og vandføringen i indløbet, der danner grundlag for beregning af den tilførte vandmængde. Vi har også brugt vind og temperaturdata fra den permanente målestation på bredden af Søndersø. Vandprøver indsamles i tilløb, afløb og forskellige steder i Filsø med ca. en uge til 10 dages mellemrum, og de rammer således et stykke før og 3 dage efter starten af iltsvindet. Vandprøver viser alligevel den meget markante stigning, der har været i søvandets indhold af organisk stof i tilknytning til iltsvindet.

Notatet er udarbejdet til Aage V. Jensen Naturfond, som kan benytte det i sine diskussioner med Miljøstyrelsen.



**Fig. 1. Placering af målestationer på Filsø. Station 1 – 4 er udstyret med lys, temperatur og ilt måleudstyr. Station 5 er udstyret med dybdelgger i indløbet og søen samt doppler udstyr, der måler vandføring. Vandføringen måles også manuelt ved denne station, når vi servicere udstyr. Ved station 6 måles der vandstand. Ved station 7 måles der pH, klorofyl og opløst farvet organisk stof**



## Baggrund

I alle de år, vi har fulgt Filsø, har vi konstateret, at kraftig nedbør i området fører til en hurtig og markant stigning i vandføringen i åen, der leder vand til Søndersø fra et meget stort drænet opland. Med den øgede vandføring stiger mængden af organisk materiale, der skylles ud i søen. Vi har vandprøver fra åen opstrøms Søvigssund, der meget tydeligt viser dette forhold. Når der tilføres øgede mængder af organisk materiale stiger bakteriernes iltforbrug i søen, som i år førte til iltsvindet i forbindelse med et skybrud efterfulgt af stille solrigt vejr, som mindsker ilttilførslen fra luften og udløser høje vandtemperaturer, som accelererer bakteriernes iltforbrug i søvandet. Kraftig nedbør har ikke i de tidligere år ført til lavt iltindhold, da det normalt er forbundet med blæst, der øger tilførslen af ilt fra luften, ligesom vandtemperaturerne aldrig tidligere har været så høje. Iltindholdet i vandet er derfor aldrig faldet under 70 % mætning i tidligere års målinger.

Samtidig med iltsvind og fiskedød i Søndersø, som modtager vand fra oplandet, har vi **ikke** konstateret iltsvind i Mellemsø, som modtager vand fra Søndersøs nordvestlige hjørne længst væk fra indløbet.

## Tilførsler og miljøforhold under iltsvindet

*Vandføring* - Den 28. juli stiger vandstanden i indløbet til Søndersø meget hurtigt med 2 cm i løbet af to timer fra klokken kl. 14 til kl. 16 efter

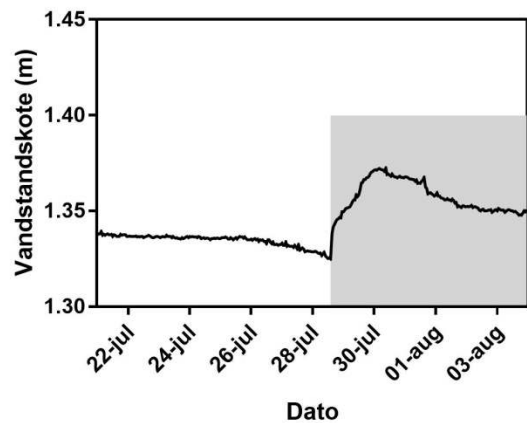


Fig. 2. Vandstand i indløbet til Søndersø fra den 21 juli til den 4 august. Grafen viser den kraftige stigning i vandhøjden i indløbet fra den 28 juli indtil vandhøjden klinger af den 4 august, dog på et fortsat højere niveau end før regnskylllet. Den grå skravering viser iltsvindsperioden.

et kraftigt regnvejr (Fig. 2). Dagen efter er vandstanden i indløbet steget med 5 cm. Derefter aftager vandstanden i indløbet gradvist over de næste dage. Vandføringen stiger hurtigt, og den når et maksimum klokken 01 den 30. juli med en vandtilførsel på  $2,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . De efterfølgende dage aftager vandtilførslen, dog med et markant højere baggrunds niveau. Den øgede vandføring efter regnskylllet betyder, at ca. 20 % af Søndersøs vand er blevet udskiftet i løbet af den aktuelle periode.

*Temperatur* - Temperatur og iltindhold måles på to stationer i Søndersø, hvor vanddybden er henholdsvis 3,5 og 2,1 meter (Fig 1). Temperaturmålerne sidder flere sammen i en



Fig. 3. Vandprøver udtaget i løbet af sommeren i Søndersø i Filsø. Flasken længst til højre er udtaget efter regnskylllet, der har ført organisk materiale ud i søen. Den brune farve skyldes organisk materiale fra oplandet. Bemærk, at vandet i alle øvrige flasker er ganske klare, så stigningen i det organiske indhold har været meget stor.

kæde med 0,5 meters mellemrum fra overfladen til bunden, mens iltmålerne sidder i to dybder på Station 1 i henholdsvis 1,5 og 3,35 meter. Den nederst iltmåler sidder altså tæt på bunden på station 1, som er søens dybeste sted. På station 2 sidder iltmåleren i 1 meters dybde. De to øverste iltmålere repræsenterer omkring 60 % af vandmassen, da middeldybden i Sønder sø er 1,3 meter. Større dybder end 2,5 meter repræsenterer en lille del (12 %) af søens samlede vandvolumen.

Temperaturmålingerne viser, at der maksimalt opbygges en temperaturforskel mellem overfladen og bundvandet på op mod 3 grader i løbet af dage med stille vejr og kraftig solindstråling (Fig. 4).

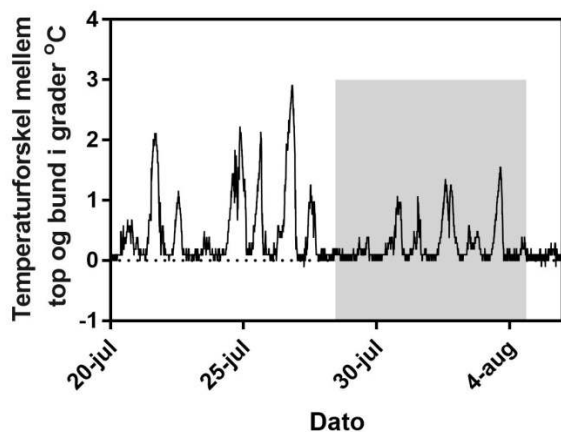


Fig. 4. Forskellen på temperaturen i overfladevandet og bundvandet på St 2. Den grå skravering viser iltsvindperioden.

Under iltsvindperioden er temperaturforskellen endnu mindre grænsende til ubetydelig – op mod 1 grad. Denne svage temperaturforskel udlignes i løbet af natten ved konvektiv opblanding, idet overfladevandet afkøles, bliver tungere og synker ned gennem vandsøjlen mod bunden, så vandsøjlen opblandes. På dage med gråvejr og vind er vandsøjlen til stadighed omrørt. Det er muligt at beregne vandsøjlen fysiske stabilitet udtrykt ved det såkaldte Schmidt stabilitets indeks  $s$  (Fig. 5). Ved tilstedeværelse af

springlag (altså temperaturfald fra overfladen til bunden) bliver tallet positivt, mens det er nul, når springlaget forsvinder, vandsøjlen blandes og temperaturen er den samme fra overfladen til bunden. Det fremgår, at der på varme dage er et lavt, positivt Schmidts tal, mens det om natten er nul, fordi der sker omrøring af vandsøjlen, som det også fremgår alene ved at se på temperaturforskellene mellem overflade- og bundvand. Konklusionen er, at der til stadighed sker omrøring af vandmassen. Der har ikke været dannet et markant og varigt springlag, der adskiller overfladevandet fra bundvandet i perioden op til eller under selve iltsvindet.

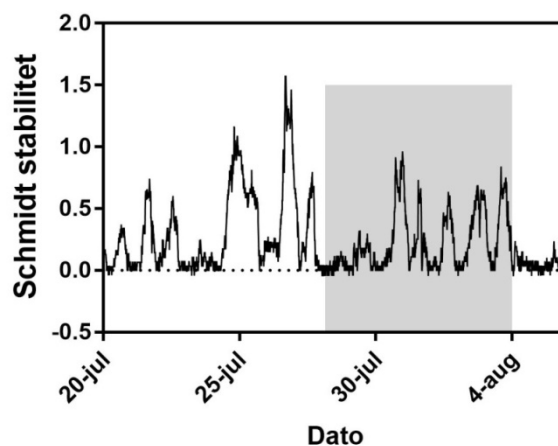


Fig. 5. Schmidt stabilitet udtrykker vandsøjlen fysiske stabilitet. Når der er springlag, er værdierne positive. Når vandsøjlen er opblandet er Schmidt stabilitet nul. Når værdierne er negative er vandsøjlen ustabil, da overfladevandet er koldere end bundvandet. Der ses en næsten daglig opblanding af vandsøjlen i den viste periode. Den grå skravering viser iltsvindsepisoden. Heraf fremgår de natlige omrøringer, hvor Schmidts tal bliver nul. Hele søens vandmasse er integreret i målinger fra samtlige dataloggere.

*Iltindhold og iltsvind* - Iltudviklingen er normalt positiv på dybderne 1,5 m og 1 m på de to stationer fra klokken ca. 07 til klokken 20 pga. ilt dannelse ved fotosyntese (Fig. 6). Derfor stiger iltindholdet typisk fra 70-100 % mætning om morgenen til 170-200 % mætning om aftenen i perioden, der fører op til iltsvindet. I denne

periode tilføres der løbende ilt selv til det dybeste bundvand i Sønderø ved omrøring af vandsøjlen. Iltindholdet i bundvandet varierer over døgnet mellem 50 og 70 % mætning. Der er altså **ikke** udviklet iltvind og iltgæld i bundvandet i perioden forud for iltsvindet. Den 28. juli afviger iltforløbet i vandmassen imidlertid markant fra det tidligere mønster, idet iltindholdet i vandet på station 1 på 1,5 meters dybde kun stiger en smule frem til kl. 14, hvorefter iltindholdet falder både i det dybe bundvand på station 1 men endnu mere i 1,5 meters dybde (se pil Fig. 6). Det er et tegn på, at iltproduktionen ved fotosyntesen er koblet af pga. uklart brunfarvet vand (Fig. 2) og dermed mangel på lys til fotosyntesen, således at iltforbruget langt overstiger ilt-dannelsen. Klokket 15:30 begynder iltindholdet også at falde på 1 meters dybde ved station 2, som ligger længere væk fra indløbet (Fig. 6).

Omkring klokken 16 den 28. juli begynder vandtemperaturen også at falde meget hurtigt på station 1 nærmest indløbet. Det betyder, at vandet omkring loggerne udskiftes med nyt og køligere vand, som følge af det koldere vand, der tilføres via indløbet. Vandmasserne kan ikke afkøles så hurtigt ved afkøling fra luften på dette tidspunkt, da luften er varm. Samtidig med at temperaturen falder, begynder iltforbruget i

vandet omkring iltloggerne at stige (Fig. 6). Det høje iltforbrug fortsætter de næste dage frem til den 4.-5. august, hvor der opstår total iltvind i hele vandmassen. Herfra stiger iltindholdet i søen igen til 100 % mætning den 6. august kl 18.

Det er muligt at beregne differencen mellem ilttilførsel ved fotosyntese i vandmassen og iltforbrug ved respiration, hvis der korrigeres for iltudveksling mellem vandet og luften. Iltudvekslingen med luften kan beregnes med kendskab til vindhastighed og vindens påvirkning over søoverfladen ved forskellige vindretninger. Differensen mellem fotosyntese og respiration er vist i Fig. 7. Heraf fremgår det, at de biologiske processer netop forbruger al ilt i løbet af iltvindperioden. Den fysiske iltudveksling mellem luften og vandet er meget lav i det stille vejr, mens den under mere normale forhold ville have været 5-10 gange større.

Der er, som understreget, ikke udviklet springlag i søen, hvilket betyder, at vandsøjlen er opblandet. Dette kan ses både ud fra temperatur og iltdata. Iltforbruget er heller ikke isoleret til bunden og skyldes **ikke** en momentan bundvending ([definition bundvending](#)). Derimod sker iltforbruget i hele vandsøjlen, og ilt forbruges med en højere hastighed i hele perioden, der leder frem til det endelige iltvind i hele

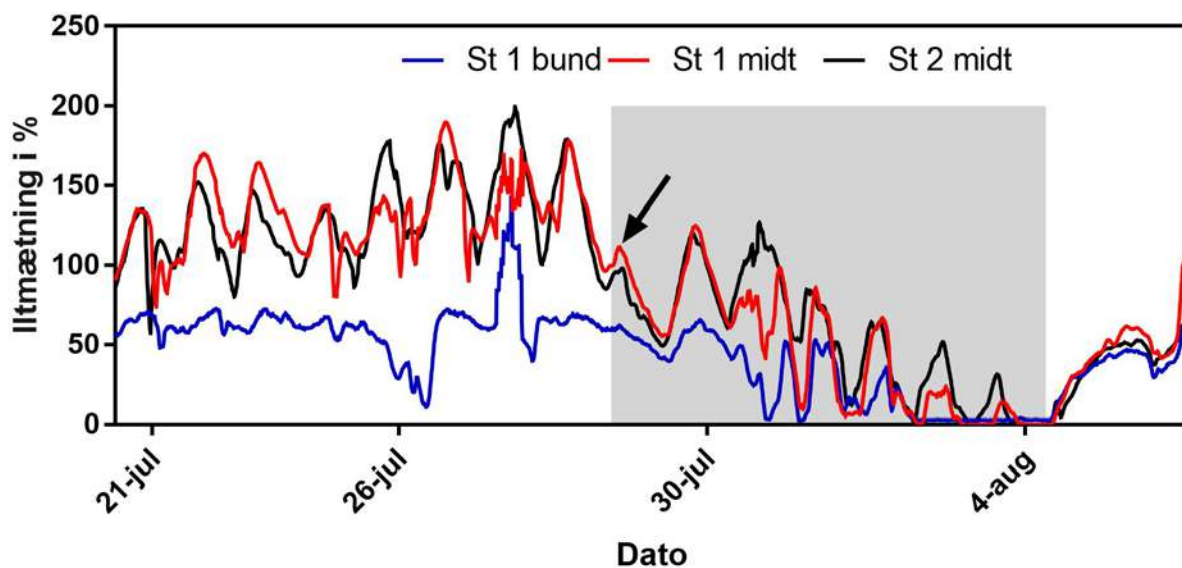


Fig. 6. Iltindholdet i Sønderø før og efter iltsvindet den 4.-5. august på station 1-1,5 m, st 1-3,35 m og st. 2-1,0 m. Station 1 ligger tættest på indløbet og station 2 længst væk fra indløbet. Det indledende fald om eftermiddagen d. 28. juli er vist ved pilen.

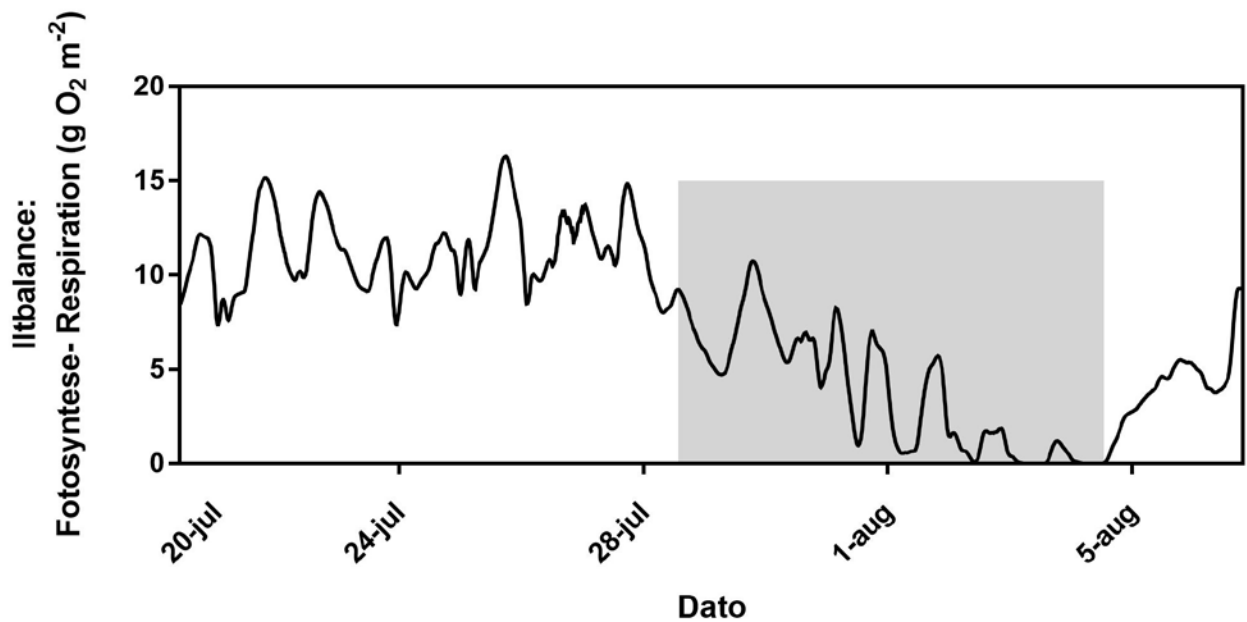


Fig. 7. Balancen mellem iltproduktion og respiration beregnet for hele vandmassen i Sønder sø. Iltudvekslingen med luften er der korrigeret for. Den grå skravering viser perioden fra begyndelsen til slutningen af iltsvindet. Beregningerne er udført for hele søens vandmasse på baggrund af iltmålere ved station 1 og 2. Målingerne er foretaget med 10 minutters interval gennem hele perioden. Udvekslingen af ilt med atmosfæren er også beregnet med 10 minutters interval ud fra vindmålinger på vejrstationen ved station 7.

vandsøjlen. Iltindholdet falder lidt tidligere på station 1 tættest på indløbet sammenlignet med station 2 længst væk fra indløbet.

*Organisk stof og iltforbrug* - Det tilførte organisk stof med tilløbet er både ufarvet og farvet opløst organisk materiale (Fig. 3). Det kan stamme fra flere mulige arealtyper i oplandet (fx. græsmarker, kornmarker, hede og skov). Det vurderes, at det organiske materiale har stået i grøfter, kanaler, drænrør og i vandmættede jorder under høje temperaturer og iltfattige forhold i det varme vejr. Det organiske materiale er blevet opkoncentreret igennem længere tid, da der ikke har været regnbyger, som har kunnet skylle materialet ud. Den tørre periode ses i vores målinger af lav vandføring og lav vandhøjde i indløbet til Filsø over sommeren forud for det pludselige kraftige regnskyl.

Den markante tilførsel af organisk stof fremgår tydeligt af vores indsamlede vandprøver.

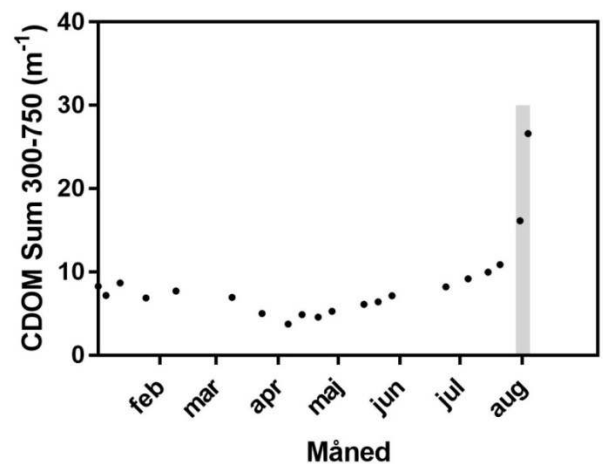


Fig. 8. Indholdet af farvet organisk materiale i Sønder sø gennem hele 2018 målt ved lysabsorbti on. Den grå markering viser perioden med iltsvind.

Indholdet af brunfarvet organisk stof, som svækker lysnedtrængningen i vandet og farver vandprøverne (Fig. 2), stiger eksplosivt med

omkring 200 % i forbindelse med iltsvindet (Fig. 8). Stigningen ville sandsynligvis have været endnu større, hvis vores indsamling af vandprøver havde ramt toppen af iltsvindet. Den samlede pulje af opløst organisk stof stiger tilsvarende markant i forbindelse med iltsvindet med omkring 150 % (Fig. 9). Det opløste organiske stof er under hurtig omsætning, da det ved bakteriernes nedbrydning er ansvarlig for iltsvindet. Faldet i indholdet fra toppunktet og i de efterfølgende dage viser netop, at det opløste stof er under nedbrydning. Hvis vi, konservativt, bruger faldet i indholdet fra toppunktet og to prøvetagningsdage frem, kan vi estimere en første-ordens nedbrydningskonstant og regne tilbage til det forventede maksimale kulstofindholdet i vandet, da iltsvindet var på sit højeste (Fig. 10). Herved når vi frem til et indhold af opløst organisk kulstof, som ligger 200 % over indholdet før iltsvindet. Dette er det mest konservative estimat på den tilførte mængde af organisk materiale, der potentielt er markant højere.

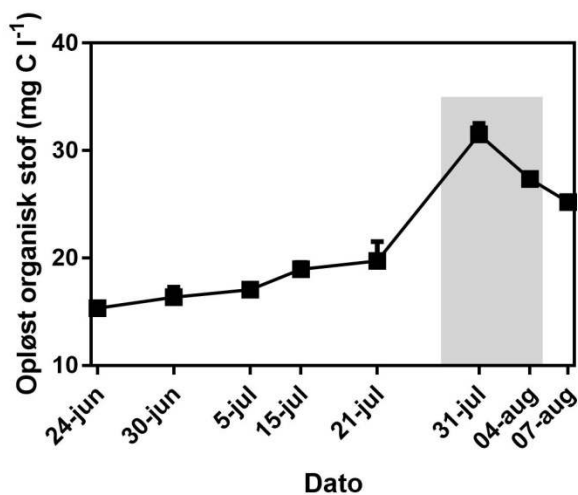


Fig. 9. Mængden af opløst organisk kulstof i Sønderø. Den grå markering viser perioden med iltsvind. Målinger er foretaget i den nordvestlige del af Sønderø.

Vi har en yderligere mulighed for at vurdere intensiteten i iltforbruget før og under iltsvindet ved at beregne iltfaldet om natten, hvor der

alene sker iltforbrug ved respiration. Det fremgår af iltkurverne, at nedgangen i iltindholdet om natten foregår meget hurtigt (kurven er meget stejl) under iltsvindet sammenlignet med før (Fig. 7). Disse beregninger viser, at iltforbruget før iltsvindet i gennemsnit er 0,4 g ilt per m<sup>2</sup> per time. I løbet af otte timer om natten kan respirationen forbruge ca. 30 % af iltindholdet i 100 % iltmættet vand. Hvilket ikke udløser problemer, da fotosyntesen om dagen og iltudvekslingen med luften let dækker dette iltfald. Under selve iltsvindet er respirationen, derimod ifølge de stejle kurver omkring 1 g ilt per m<sup>2</sup> per time om natten.

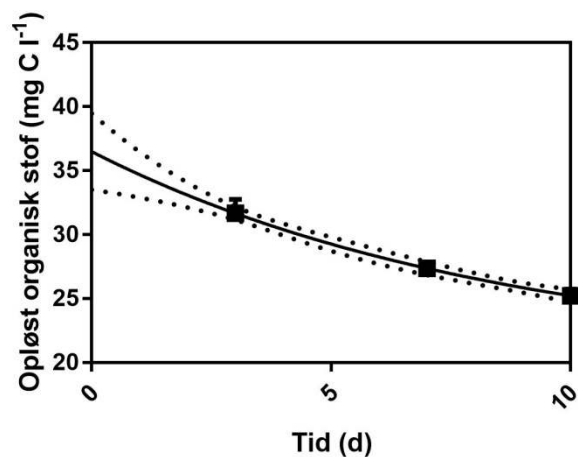


Fig. 10. Faldet i indholdet af opløst organisk kulstof i perioden fra, hvor iltsvindet startede til det sluttede. Firkanterne viser målte værdier, mens linien viser det modellerede forløb i nedbrydning af opløst organisk kulstof gennem perioden. De prikkede linier angiver 95 % statistiske sikkerhedsgrænser i tilknytning til modelberegningen. Tiden 0 angiver den beregnede koncentration af opløst organisk kulstof i søen lige ved starten af iltsvindet.

En nat kan derfor forbruge 80 % af iltindholdet i 100 % mættet vand. Denne iltgæld kan ikke dækkes om dagen, da fotosyntesen er reduceret pga. uklart vand og det stille vejr begrænser tilførslen fra luften. Derfor vil iltforbruget udløse totalt iltvind. Beregningerne understøtter således, at det forhøjede iltforbrug udløser

iltsvindet og det udvikles gradvist over få dage. Fotosyntesen er ikke slået ud, men er begrænset af lysmangel, og når lyset vender tilbage (eller vinden tager til) stiger iltindholdet. Fytoplanktonet er således ikke slået ud af iltsvindet.

## **Konklusion**

Iltsvindet i Filsø er opstået som et samspil af klimatiske faktorer med meget varmt og tørt vejr over en rekordlang periode og stor ophobning af organisk stof i et meget stort og kraftigt drænet opland med grøfter, kanaler og drænrør. Det ophobede organiske stof udtømmes pludseligt i søen efter et skybrud og giver anledning til kraftigt iltsvind i det varme vand pga. forhøjet iltforbrug til nedbrydning af det tilførte organiske stof samt marginal ilttilførsel fra luften i det stille vejr og fra fotosyntese pga. udslukning af lyset af det brunfarvede organiske stof.

Vores kontinuerlige målinger af temperatur understreger, at søens vandmasse udvikler en meget svag lagdeling om dagen, men søen omrøres fuldstændig om natten. De kontinuerlige iltmålinger viser, at iltsvindet begynder om eftermiddagen den 28. juli og udvikler sig gradvist til totalt iltsvind i hele vandmassen i løbet af de næste dage. Årsagen hertil er at iltforbruget stiger, mens ilt-dannelsen ved fotosyntese falder på grund af uklart, brunt vand. Tilførslen af brunt farvet vand og opløst organisk stof øger indholdet i søvandet med mindst 250 og 170 % i tilknytning til iltsvindet.