



Furesø Kommune

Furesø 2007 - 2009

Effekt af iltilførsel

Furesø Kommune

Furesø 2007 - 2009

Effekt af ilttilførsel

Ref 9406069
Version 3
Dato 8. marts 2010
Udarbejdet af INGT, OG
Kontrolleret af
Godkendt af OG

Rambøll Danmark A/S
Bredevej 2
DK-2830 Virum
Danmark

Telefon +45 4598 6000
www.ramboll.dk

Indholdsfortegnelse

1	Baggrund og sammenfatning	1
1.1	Furesø-restaureringens mål	1
1.2	Datagrundlag	1
1.3	Sammenfatning	2
1.4	Konklusion	3
2	Ilt	5
2.1	Baggrund for iltforbrug - processer ved omsætning af organisk stof	5
2.2	Iltindhold og – ilttilførsel i Furesø 2007-2009	5
2.3	Vurdering af iltindholdet i Furesø 2007-2009	9
3	Temperatur	10
4	Sigtdybde og klorofyl	11
5	Fosfor- og kvælstofdynamikken	13
5.1	Fosfor - og kvælstofindholdet i overfladevandet	13
5.2	Fosforindholdet i bundvandet	17
5.3	Sedimentundersøgelse	18
6	Alger og undervandsvegetation	20
6.1	Planteplankton	20
6.2	Undervandsvegetation	21
7	Konklusion og forslag til iltningsstrategi	24
8	Referencer	26

1 Baggrund og sammenfatning

Som et led i restaurering af Furesø er der siden 2003 udledt rent ilt til bundvandet i sommerhalvåret. Ved normal drift er der udledt mellem 1 til 6,5 tons pr døgn i perioden maj til oktober (afhængig af, hvor længe der er springlag).

Formålet med iltningen er at sikre iltede forhold i bundvandet, således at fosfor ved kemisk binding forbliver bundet i sedimentet, og desuden at skabe gode levevilkår for de dyr, der lever i og ved bunden i søen.

Furesø Kommune har siden 2007 stået for driften af iltningsanlægget.

Furesø Kommune har bedt Rambøll om at opdatere rapporten /1/, give en status over Furesøs tilstand og vurdere iltningen i 2007 – 2009, samt give et forslag til iltningstrategi for de kommende år.

1.1 Furesø-restaureringens mål

Frederiksborg Amts overordnede mål med restaureringen af Furesø var på sigt at genskabe den tilstand søen havde i år 1900. Dette noget upræcise mål blev ved igangsætning af restaureringsprojektet i 2003 præciseret i følgende målbare delmål:

1. Der skal skabes gode levevilkår for dyrelivet under springlaget. Det vil sige at iltindholdet ikke må være under 6 mg/l.
2. Sigtdybden skal være større end 4 meter som gennemsnit i sommerperioden.
3. Der må ikke forekomme opblomstringer af blågrønalger.
4. Undervandsvegetationen skal igen kunne vokse på dybder større end 6 meter.
5. Det årgennemsnitlige fosforindhold i overfladevandet skal være mindre end 40 µg/l.
6. Der skal være en balanceret fiskefaunasammensætning.
7. De tilbageværende reliktkrebs skal forekomme i levedygtige bestande.

1.2 Datagrundlag

Effekten af iltningen er til og med 2006 blevet fulgt af Københavns Amt og der foreligger for perioden 2003-07 en lang række data, samt rapporter der sammenfatter resultater fra profilmålinger, sigtdybdemåling (vandets klarhed), vandkemiske analyser, plankton-, bunddyr og vegetationsundersøgelser i søen.

Herudover har Furesø siden 1989 været omfattet af det nationale overvågningsprogram og er indgået i programmet som en intensiv sø. Programmet er løbende blevet ændret, sidst i 2007 /10/. I alle årene er der dog som minimum udtaget vandprøver og gennemført målinger på station 1644, som er placeret på det dybeste sted i Fure-

sø. På trods af ændringer i prøvetagningsprogrammet har analyseparametrene her været de samme alle år, dog er bundvandsprøverne fra 2007 kun analyseret som én enkelt blandingsprøve, og ikke som tidligere som en række delprøver i forskellige dybder under springlaget.

Følgende data fra overvågningen er inddraget i nærværende rapport:

- Iltindholdet i bundvandet
- Profilmålinger af temperatur
- Fosfor og kvælstof fra overfladevand og bundvand
- Klorofylindholdet
- Sigtdybdemålinger
- Vegetationsundersøgelse 2008
- Planktonundersøgelser 2007

De ovennævnte data er trukket ud fra STOQ databasen, dog undtagen planktonundersøgelserne hvor figurer er hentet fra /9/.

Endvidere indgår daglige flowmålinger af ilttilførslen 2007 -2009 oplyst af Furesø Kommune, samt ældre data og figurer fra tidligere rapporter i det omfang det er nødvendigt for forståelsen af udviklingen i søen.

1.3 Sammenfatning

Tilstand og udvikling af ovenstående parametre er gennemgået i kapitel 2 til 6. I afsnittet nedenfor sammenholdes tilstanden i Furesø 2007 - 2009 med restaureringens delmål 1-5, se afsnit 1.1.

Delmål 1. Gode levevilkår for dyrelivet under springlaget. På grund af tilførslen af ilt i Furesøen er iltforholdene i bundvandet i sommerperioden forbedret væsentligt siden iltningen startede i 2003. Iltningen har medvirket til, at der ikke længere opstår alvorlige og længerevarende iltfrie forhold i bundvandet. Delmålet med hensyn til gode levevilkår for dyrelivet og et iltindhold i det meste af vandsøjlen på over 6 mg/l er opfyldt i 2007-2009, dog dykkede iltindholdet lige over bunden i 2008 ned under 2 mg/l. Øget ilttilførsel i 2009 medførte, at iltindholdet i bundvandet ikke på noget tidspunkt blev målt til at være lavere end 3 mg/l. På baggrund af visuelle beskrivelser af udtagne sedimentprøver vurderes det, at sedimentet er iltet, og at der er gode forhold for de bundlevende dyr.

De gode iltforhold i vandet under springlaget har stor betydning for dyrelivet i søen. Både fisk og zooplankton kan nu leve i hele vandsøjlen sommeren igennem og har fået langt bedre levevilkår end før iltningen startede. Dette har efter al sandsynlighed medført ændringen i søens biologiske struktur.

Ikke mindst forventes de sjældne små krebsdyr, istidsrelikter, at nyde godt af, at de hele året kan finde den rette kombination af lav vandtemperatur og højt iltindhold.

Delmål 2. Sommersigt dybde større end 4 m. Middelsommersigt dybden i 2007, 2008 og 2009 var henholdsvis 4,4, 5,1 og 4,7 meter; det højeste niveau i over 30 år. Dette skyldes, at algebiomassen var lille, og at blågrønalger ikke længere er den dominerende algegruppe. Denne tendens er vigtig at fastholde, og en forudsætning herfor er, at næringssaltene fosfor og/eller kvælstof forekommer i lave koncentrationer.

Delmål 3. Ingen masseopblomstring af blågrønalger Der var ingen masseopblomstring af blågrønalger hverken i 2007 eller 2009. I august 2008 var der en mindre opblomstring af blågrønalger, og Furesøbad var af den grund lukket én dag.

Delmål 4. Undervandsvegetationen skal igen kunne vokse på dybder større end 6 meter. Vegetationsundersøgelsen fra 2008 tyder på, at dette delmål er rigeligt opfyldt. Vegetationen var i 2008 både artsrig og veludviklet, og dybdegrænsen for bundvegetationen var den størst registrerede i mange år. Der er ingen data fra Store Kalv, men kvalitative observationer tyder på, at undervandsvegetationen nu også er veludviklet her.

Delmål 5. Det årgennemsnitlige fosforindhold i overfladevandet skal være under 40 µg/l. Delmålet er ikke opfyldt, idet fosforkoncentrationen på årsbasis i 2007, 2008 og 2009 var hhv. 63 µg/l, 73 µg/l og 74 µg/l. Der skete efter iltningens start i 2003 et mindre fald i fosforkoncentrationen. I perioden 2006-2009 er der ikke sket yderligere fald i overfladevandets fosforkoncentration.

Delmål 6 og 7 om hhv. fiskefauna og reliktkrebs er ikke undersøgt, men de forbedrede iltforhold har formentlig givet reliktkrebsene bedre levevilkår.

1.4 Konklusion

Som det fremgår af ovenstående har de fleste af de undersøgte delmål gennemgået en positiv udvikling siden iltningens start. Forbedringen af Furesøens tilstand kan dog ikke alene forklares ved restaureringsindgrebet, der er målrettet mod mindre fosforfrigivelse fra bundsedimentet. Total-kvælstof har været faldende siden spildevandsafskæringen midt i 70'erne og etablering af kvælstoffjernelse på Stavnsholt renseanlæg i 90'erne, dog med en lidt lavere rate end total-fosfor.

Uorganisk fosfor og kvælstof, som umiddelbart er de styrende næringssalte om sommeren, er reduceret endnu mere dramatisk i samme periode, og især har uorganisk kvælstof om sommeren, siden 2005 (og mere stabilt siden 2007) været nede på et niveau, der er direkte er begrænsende for planktonvæksten. Om der er en sammenhæng med iltningen, om det skyldes et fald i den eksterne belastning eller andre faktorer er ikke klart.

Det er for tidligt at fastslå om Furesø for alvor er sluppet af med sine miljøproblemer. Søens tilstand er under stadig forandring og har endnu ikke været stabil i en længere periode, selvom forbedringerne i tilstanden har været betydelige. Hvis iltningen stoppes nu vil der under alle omstændigheder blive iltfrit ved bunden - til skade for reliktkrebs og fisk - og der vil frigives relativt store mængder fosfor. Om de lave kvælstofniveauer alligevel er i stand til at holde planktonproduktionen nede er uvist. Uden en nøjere undersøgelse, og/eller en modellering, der inkluderer kvælstofbalancen, er det ikke til at vide, om de lave kvælstofniveauer skyldes en lavere belastning, en øget denitrifikation pga. iltningen af bundvandet, eller måske et forøget optag i planterne. Der vil ved et forøget fosforniveau, som potentielt vil opstå, hvis iltningen oprørte, også være en risiko for nye blooms af kvælstoffikserende blågrønalger.

Dyrelivet i Furesø har under alle omstændigheder fået langt bedre levevilkår som følge af ilttilførslen, og sikring af gode iltforhold i bundvandet vurderes alene af den årsag at være af stor betydning. Derfor anbefales det, at iltningen af Furesøens bundvand i sommerperioden fortsætter i 2010, men hvis forbedringerne i klorofylindhold, sigtdybde og undervandsvegetation stadig fastholdes i 2010, anbefales det også, at der foretages en grundig revurdering af hele næringssaltproblematikken, med henblik på at undersøge hvornår de opnåede forbedringer kan forventes at være så stabile, at de kan evt. kan opretholdes uden kunstigt åndedræt.

2 Ilt

2.1 Baggrund for iltforbrug - processer ved omsætning af organisk stof

Iltten i bundvandet i Furesø bruges primært til at nedbryde og omsætte det organiske materiale, der sedimenterer på bunden.

Omsætningen af det sedimenterede organiske stof sker ved en række processer både under aerob (iltede) forhold og anaerob (iltfrie) forhold i de øverste cm af sedimentet.

Under lagdelingen er der kun en begrænset mængde ilt til rådighed til de aerobe processer, nemlig den iltmængde der var i bundvandet, da lagdelingen opstod i foråret. Den aerobe nedbrydning af det organiske stof sker ved bunddyr (myggelarver, børsteorme o.a.) eller forskellige arter af bakterier gennem *oxygenrespiration*.

Iltten forbruges imidlertid ikke alene til direkte omsætning af organisk stof. Der sker også en *nitrifikation*, hvor ammonium (NH_3^+), der dannes ved nedbrydning af organisk stof, oxideres over nitrit (NO_2^-) til nitrat (NO_3^-) ved en bakteriologisk proces.

Et af målene med iltningen af Furesø er bl.a. at opretholde iltede forhold ved sedimentoverfladen og sikre, at omsætningen af det organiske stof sker under iltede forhold.

Det kan være vanskeligt at måle iltindholdet lige over sedimentoverfladen, men ifølge ovenstående må det forventes, at såfremt indholdet af ammonium i bundvandet er lavt, er ilttilførslen tilstrækkelig stor til at sikre, at der er aerobe forhold ved sedimentoverfladen.

Selvom der er ilt i bundvandet falder iltkoncentrationen normalt i de øverste par cm af sedimentet til nul, og de anaerobe (iltfrie) processer overtager herefter nedbrydningen af det organiske stof dybere i sedimentet. Hvis der ikke er ilt tilstede, vil der ske en omsætning af det organiske stof under reduktion af bl.a. jern, som reduceres fra $\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$. Det er i denne proces, at jernets evne til at fastholde fosfor forsvinder. Rent visuelt kan man se, hvor overgangen mellem de iltede og ikke iltede lag er i sedimentet, idet der sker et farveskifte fra gulbrunt over mørkegrønt til kul-sort. Dette skyldes reduktionen af det gulbrune ferrijern (jern-3, Fe^{3+}) til ferrojern (jern-2, Fe^{2+}). Den gulbrune sedimentoverflade skyldes jernets forbindelser som ferrihydroxider og oxider og den sorte skyldes især sulfid.

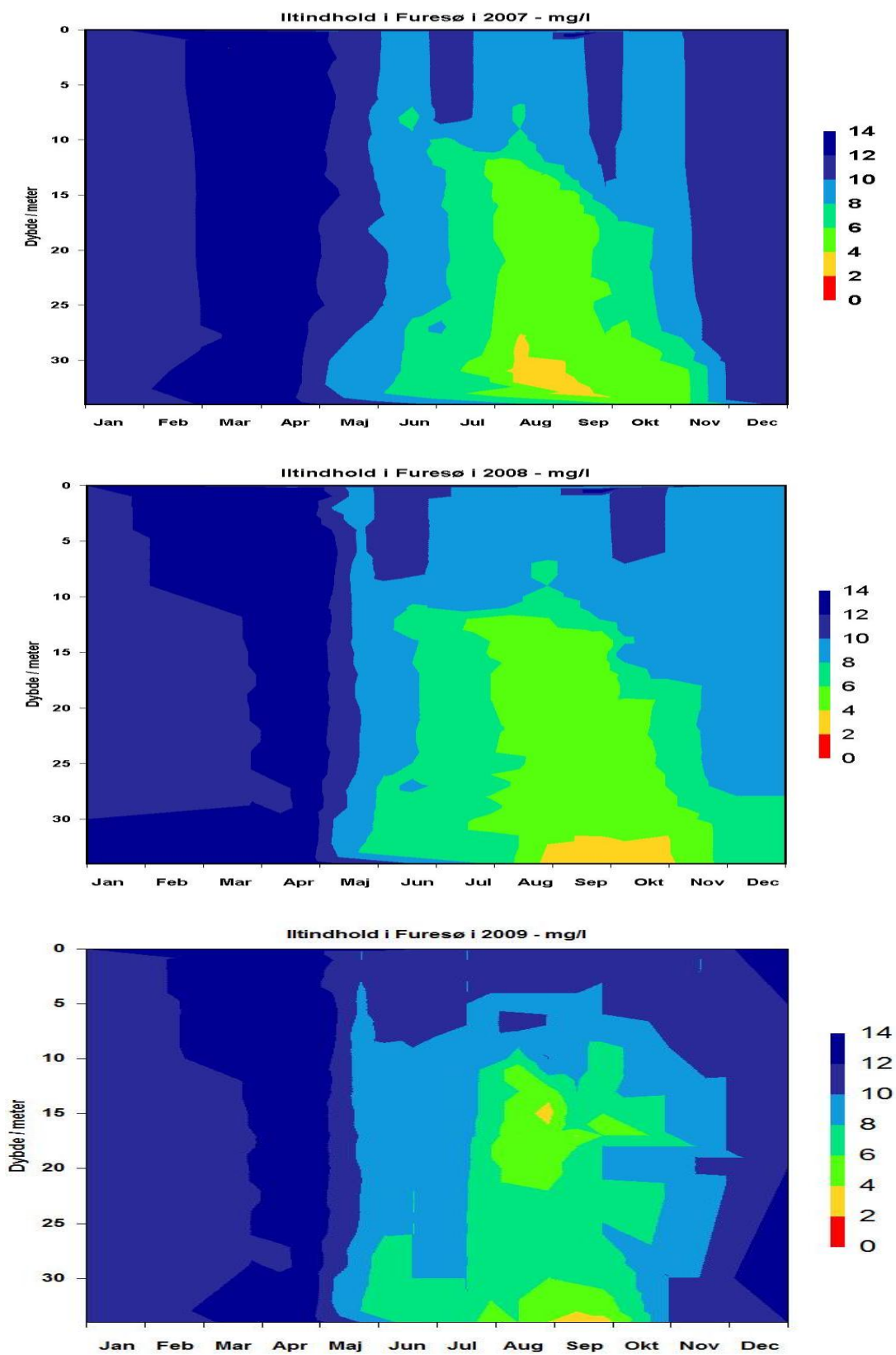
Et af de væsentligste mål med iltningen af Furesø er netop at sikre, at den anaerobe omsætning med blandt andet reduktion af jern sker i de dybereliggende lag af sedimentet, således at fosforets bindingsevne i sedimentoverfladen opretholdes.

2.2 Iltindhold og ilttilførsel i Furesø 2007-2009

Iltindholdet i Furesø måles af Miljøcenter Roskilde ca. 1 gang om måneden i vinterhalvåret og ca. hver 14. dag i sommerhalvåret. På Figur 2-1 ses iltindholdet i Furesø i 2007-2009. Overordnet set var iltindholdet i bundvandet i sommerperioden 2007 og især 2008 noget lavere end i 2009.

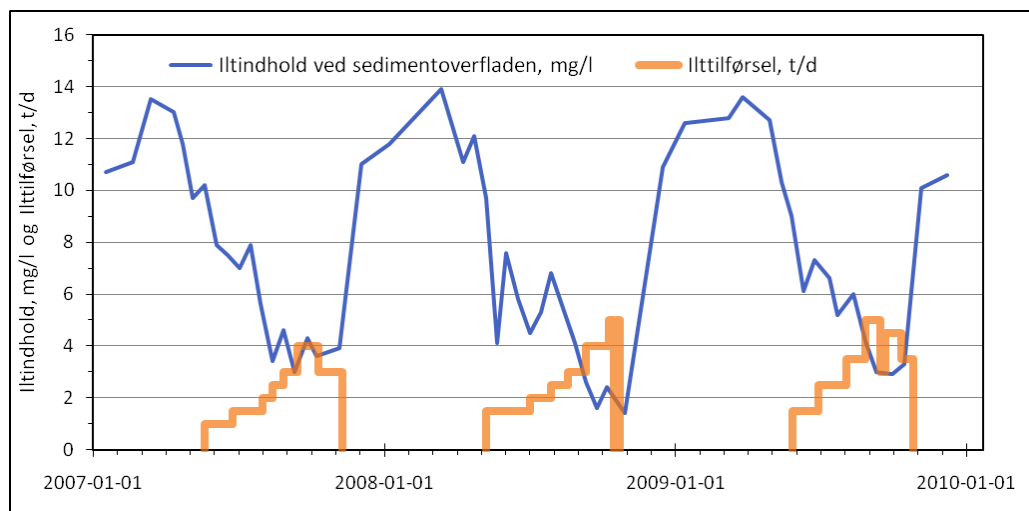
Som det fremgår af figur 2.1 er iltindholdet i Furesø fra top til bund ca. 12 mg/l i perioden november til maj, hvor der ikke er springlag i søen. Fra det tidspunkt hvor springlaget dannes, begynder iltindholdet under springlaget, trods tilførsel af ilt, at falde. Men iltindholdet er alle år over 4 mg/l i størstedel af vandsøjlen, hvilket vurderes at være tilstrækkeligt højt til at dyrelivet kan trives under springlaget. Ingen af årene blev der målt iltfrie forhold i søvandet.

I 2009 blev det laveste iltindhold i søvandet målt omkring springlaget, hvilket må tilskrives nedbrydning af dødt planteplankton som akkumuleres her.



Figur 2-1 Iltindholdet i Furesø 2007-2009. X-aksen repræsenterer årets måneder, og Y-aksen er vanddybden med overfladen øverst. Farverne angiver iltindholdet, og gul farve angiver iltindhold under 4 mg/l. Springet i iltindhold fra december 2008 til januar 2009 skyldes at interpolationen mellem målepunkter er foretaget år for år, dvs at januar 2009-værdierne ikke indgår i beregningerne for 2008.

Hovedformålet med iltningen af Furesø er at undgå iltfrie forhold ved sedimentoverfladen. Om dette er "lykkedes" kan ikke ses på ovenstående figurer, og derfor sammenholdes i det følgende iltindholdet lige over sedimentoverfladen med ilttilførslen.



Figur 2-2 Iltindholdet i vandet nærmest sedimentoverfladen og tilførselen af ilt pr døgn i årene 2007, 2008 og 2009.

Fra springlagets dannelse i slutningen af maj til august 2007 faldt iltindholdet lige over bunden fra 10 mg/l til 4 mg/l. I samme periode blev der tilført først 1,5 og siden 2 tons ilt pr. døgn. Dette var imidlertid ikke nok til at holde iltindholdet oppe. Derfor blev der skruet yderligere op 2 gange i august, hvilket medførte at iltindholdet ikke faldt yderligere.

I 2008 faldt iltindholdet lige over sedimentoverfladen fra ca. 10 mg/l i begyndelsen af maj til 4 mg/l i august måned. Der blev løbende skruet op for ilttilførslen fra 1,5 ton/døgn i starten af maj til 3 ton/døgn i midten af august. På trods af den løbende opjustering af ilttilførsel lykkedes det ikke at holde iltniveauet, der faldt til under 2 mg/l. Der blev derfor skruet yderligere op for ilttilførslen først i midten af september til 4 ton/døgn og derefter i midten af oktober til 5 tons/døgn, dette resulterede i en stabilisering af iltindholdet. Desværre svigtede ilttilførslen i oktober, hvilket medførte at der ikke blev ledt ilt til Furesø i 3 døgn. Iltindholdet i søen faldt til under 2 mg/l.

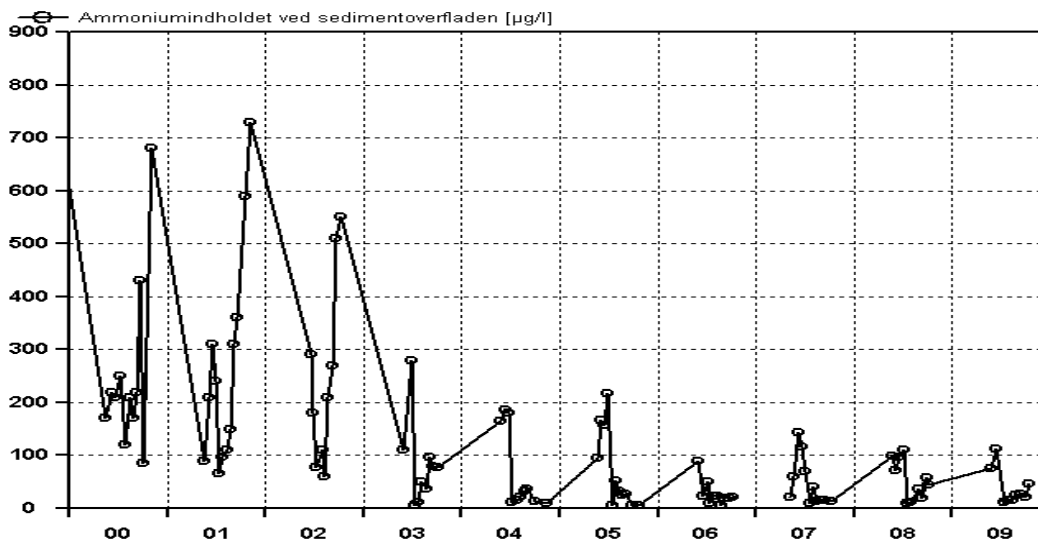
I 2009 startede iltningen op ved springlagets dannelse i maj måned. Igennem de næste par måneder blev der som følge af faldende iltindhold skruet løbende op for ilttilførslen. Ilttilførslen pr døgn var i 2009 højere end i de foregående 2 år, hvilket som vist i figur 2.1 og 2.2 havde en effekt på iltindholdet i bundvandet. I alt blev der udledt 450, 456 og 496 t ilt i hhv. 2007, 2008 og 2009

I detailprojektet for iltningen /8/ blev det forventet, at det efter nogle år var muligt at nedtrappe ilttilførslen til bundvandet, uden at iltindholdet ville falde. Dette har endnu ikke været tilfældet i Furesø, men det forventes dog at i takt med faldende produktion og udsedimentering af organisk stof (alger), så vil iltforbruget i bundvandet falde. Dermed burde det blive muligt at nedtrappe ilttilførslen uden at risiko for, at der opstår iltfrie forhold i bundvandet. Tidspunktet er vanskeligt at forudsige, for

selvom produktionen falder, ligger der stadig en stor pulje af organisk stof på bunden, der blev ophobet under tidligere tiders høje produktion og iltfrie forhold.

2.3 Vurdering af iltindholdet i Furesø 2007-2009

Det kan være vanskeligt at måle iltindholdet lige over sedimentoverfladen, men som omtalt i afsnit 2.1 og i /8/ må det forventes, at såfremt indholdet af ammonium i bundvandet er lavt, er iltindholdet og dermed også ilttilførslen tilstrækkelig stor, til at sikre aerobe forhold ved sedimentoverfladen.



Figur 2-3 Ammoniumindholdet i bundvandet i Furesø 2000-2009.

På figur 2.2 ses årstidsvariationen i ammoniumindholdet i Furesø. I 2000 og 2001 altså før iltningen startede steg ammoniumindholdet kraftigt i løbet af sommerperioden, hvilket stemmer overens med, at der opstod iltfrie forhold, og at der dermed ikke skete en omsætning af ammonium. I 2004 – 2009 blev der målt meget lavere værdier af ammonium end før iltningen startede i 2003, hvilket tyder på, at der har været tilstrækkelig ilt tilstede til at omsætte ammonium. Dette tyder også på at der ikke er opstået iltfrie forhold i bundvandet.

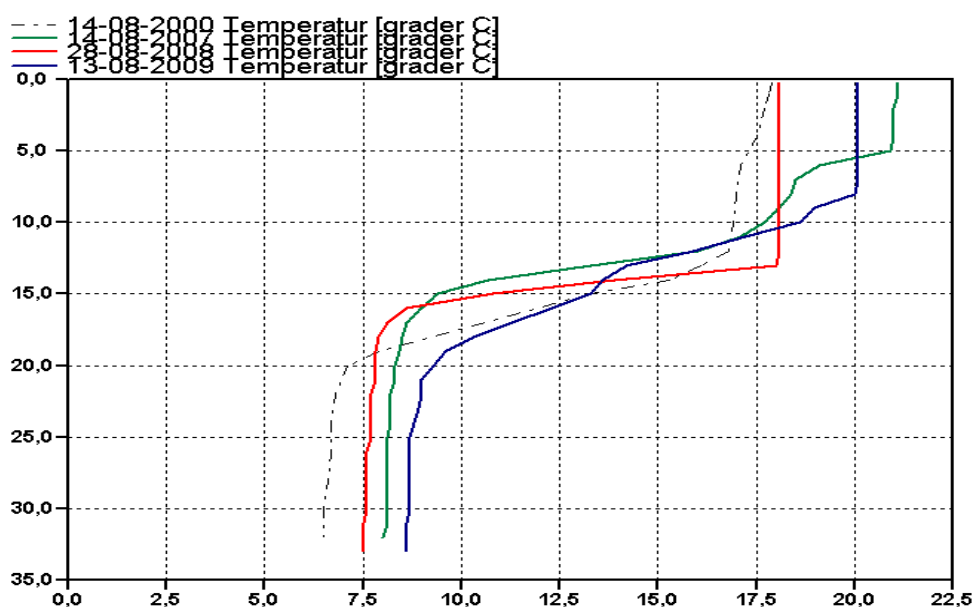
I november 2009 blev der af Roskilde Miljøcenterudtaget 9 sedimentsøjler i Furesø fordelt på 3 stationer. Herudover blev der udtaget prøver på det dybeste sted i foråret 2009. Sedimentsøjlerne blev alle ved udtagelsen visuelt beskrevet som værende lysebrunt i de øverste 0-5 cm, herefter tiltagende mørkere og omkring 10 cm dybde mørkebrunt/sort. Den lysebrune farve angiver som beskrevet i afsnit 2.1 at jernforbindelserne i sedimentet er iltet. Til sammenligning kan det nævnes at sedimentsøjler udtaget i 2000 i forbindelse med NOVA -programmet alle blev beskrevet som værende sorte i de øverste cm. Der er altså sket en tydelig ændring i sedimentets udseende i de øverste 5 cm, og på den baggrund, må det konkluderes at iltningen har haft den ønskede effekt. Det er lykkedes at skabe iltede forhold i sedimentet og dermed skabe de rigtige betingelser for at jernforbindelserne forbliver iltet og dermed er i stand til at binde fosfor til sedimentet i sommerperioden.

3 Temperatur

Det er erfaringen fra Furesø og andre søer, der har fået tilført ilt til bundvandet, at temperaturen under springlaget øges, som følge af den vandbevægelse i bundvandet udledningen af ilt skaber. Derved kan der opstå risiko for, at springlaget nedbrydes eller at springslagsperioden afkortes /4/.

Temperaturprofilen i august måned i Furesø 2007-2009 er vist på Figur 3-1. Som det fremgår af figuren, er der alle 3 år et tydeligt springlag i søen.

Temperaturen under springlaget var i 2007-2009 omkring 8 grader. Dette er 1 grad højere end "normalt" for Furesøens bundvand /3/. Årsagen behøver ikke at være iltningen, idet 2007-09 var tre usædvanlig varme år (og vintre) hvor der blev sat flere temperaturrekorder. Denne temperaturstigning vurderes at være uden væsentlig betydning, men kan dog bidrage til en øget nedbrydningsrate af organisk stof i sedimentet, og dermed et øget iltforbrug. En nedbrydning af springlaget "før tid", midt på sommeren, vil have katastrofale følger, og derfor bør temperaturfordelingen i søen have ekstra opmærksomhed i de perioder, hvor der iltes.

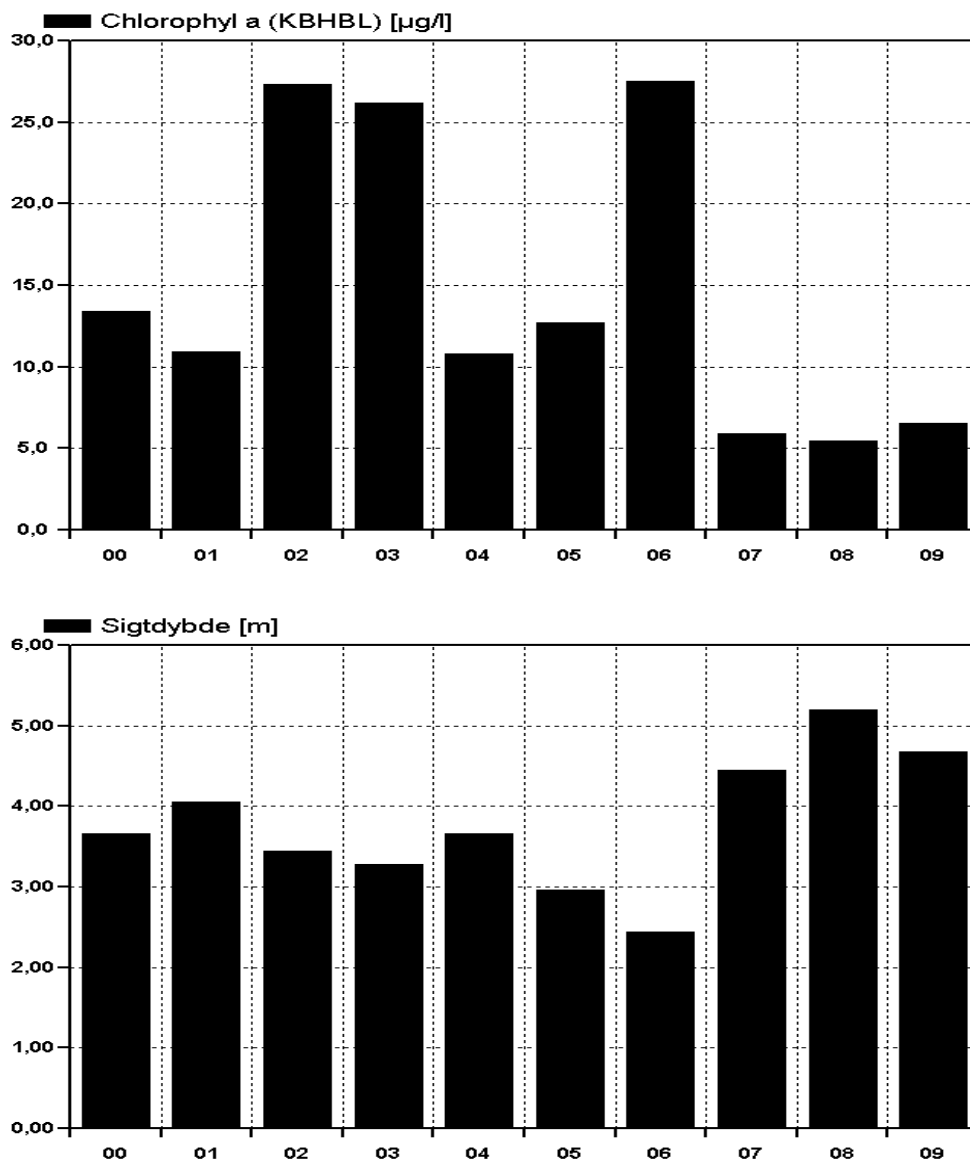


Figur 3-1 Temperaturfordeling i Furesø august 2007-2009 samt med stiplet linje år 2000.

4 Sigtdybde og klorofyl

Den gennemsnitlige sigtdybde (vandets klarhed) og klorofylindhold (udtryk for algemængden) i sommerperioden (1. maj til 30. september) i Furesø ses i Figur 4-1.

Sigtdybde og klorofyl behandles under ét, idet der generelt er en god sammenhæng mellem klorofylindholdet og sigtdybden i Furesø, jo lavere klorofylindhold (færre alger), desto klarere vand.



Figur 4-1 Det gennemsnitlige klorofylindhold i Furesø (øverste panel) og den gennemsnitlige sommersigtdybde (1. maj til 30. september)(nederste panel) i 2000-2009.

Indtil 2007 var der ingen tydelig udvikling i hverken sigtddybden eller klorofylindholdet i sommerperioden, men i 2007 skete der et markant skift. Klorofylindholdet faldt til meget lave værdier, vandet blev klarere, dvs. sigtddybden øgedes markant - se Figur 4-1 samt Tabel 4-1. Foruden lav algebiomasse skete der også en ændring i algesammensætningen (se afsnit 6).

Klorofylindholdet er foreløbig den eneste indikator, der anvendes i de kommende vandplaner til vurdering af, om søerne i Danmark opfylder deres miljømål. For Furesø, skal klorofylindholdet ifølge /6/ være lavere end 12 µg/l udtrykt som gennemsnit over en 5-års periode, for at miljømålet vurderes at være opfyldt. Gennemsnittet af de sidste 5 års klorofylindhold i sommerperioden (2005-2009) i Furesø er 11 µg/l og søen lever dermed op til sit miljømål. Gennemsnittet af de sidste 3 års klorofylværdier er 6 µg/l. I "Udkast til Vandplan for Øresund" /6/ er det aktuelle klorofylindhold angivet 17 µg/l, beregnet som et gennemsnit i for somrene (1/5-30/9) 2003-2007.

Tabel 4-1 Sommergennemsnit (1/5 til 30/9) af hhv. klorofyl, sigtddybde og total fosfor for årene 2007 - 2009. For totalfosfor er også årsgennemsnittet angivet.

	2007	2008	2009
Sigtddybde, m	4,4	5,1	4,7
Klorofyl a, µg/l	5,9	5,4	6,6
Total fosfor µg/l (sommer)	34	53	49
Total fosfor µg/l (år)	63	73	74

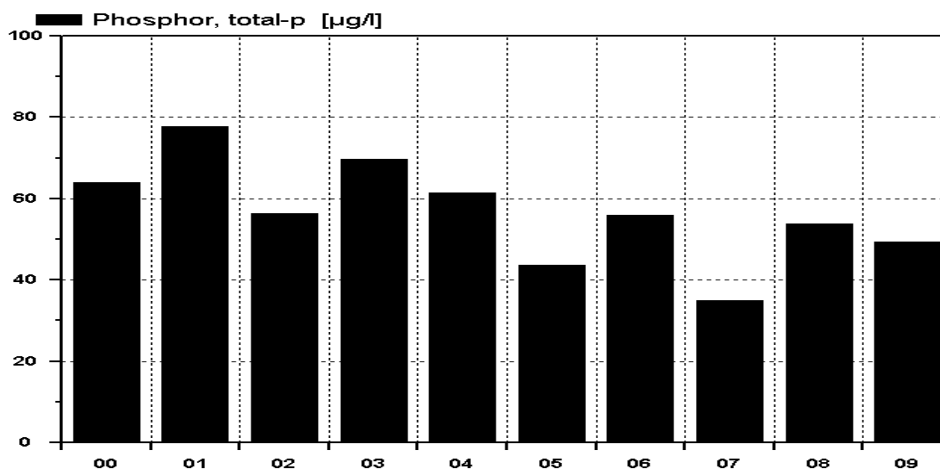
En sommersigtddybde på over 4 m var et af de oprindelige mål med iltningsprojektet, og et mål der endnu ikke var opnået ved afslutningen af LIFE-projektet i 2006. Siden 2007 har sommersigtddybden varieret mellem 4,4 og 5,1 m.

5 Fosfor- og kvælstofdynamikken

I det følgende gennemgås fosforindholdet i Furesø. Som nævnt i afsnit 1.3 er analyserne af bundvandet ændret fra 2007, men det vurderes dog, at det forsat er muligt at foretage sammenligninger med tidligere år. Afsnittet indeholder tillige en vurdering af kvælstofindholdet, selvom restaureringsindgrebet ikke er målrettet mod nedbringelse af dette nærings salt.

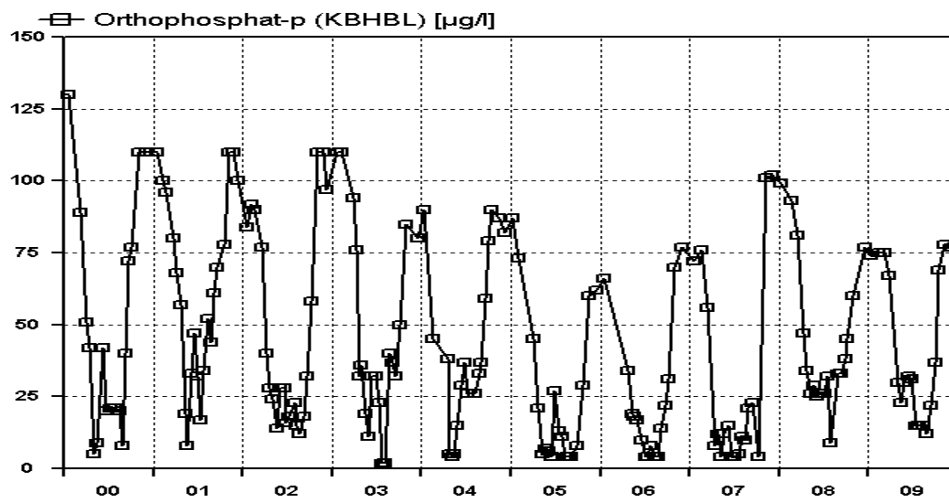
5.1 Fosfor - og kvælstofindholdet i overfladevandet

Faldet i totalfosforindholdet i overfladevandet siden iltnings start i 2003 er hverken særlig tydeligt eller statistisk signifikant (se Figur 5-1).



Figur 5-1 Gennemsnitlige totalfosforindhold i Furesø i sommerperioden (1. maj til 30. september) i overfladevandet 2000-2009.

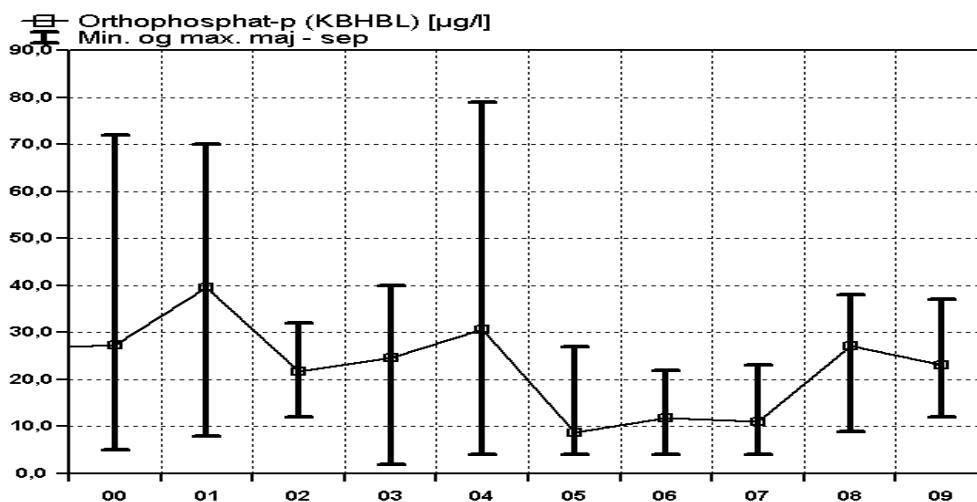
I tabel 4-1 ses udviklingen af total fosfor både på årsbasis og som sommergennemsnit 2007-2009. Som det ses var gennemsnitkoncentrationerne lavere i 2007 end både 2008 og 2009. Den manglende tydelige effekt på fosforindholdet i overfladevandet af iltningen er kendt fra andre søer der er blevet iltet, og kan i de fleste tilfælde forklares ved at den eksterne fosforbelastning forsat er for høj, og derved reelt påvirker søen mere end den interne belastning /7/. Den eksterne belastning i Furesø 2007-2009 er ikke opgjort og derfor kan det ikke med sikkerhed siges, om det samme er tilfældet for Furesø.



Figur 5-2 Koncentration af tilgængeligt fosfor - orthofosfat - i overfladevandet.

Alger har primært behov for næringsstofferne fosfor og kvælstof til deres vækst. Algerne kan, forenklet udtrykt, blive ved med at vokse indtil et af næringsstofferne er brugt op og dermed begrænser væksten. Oftest er det fosfor, der begrænser algevæksten i danske søer /2/ og det er netop på den baggrund, at det blev foreslået at mindske fosforfrigivelsen fra sedimentet, og dermed nedbringe mængden af tilgængeligt fosfor i Furesø.

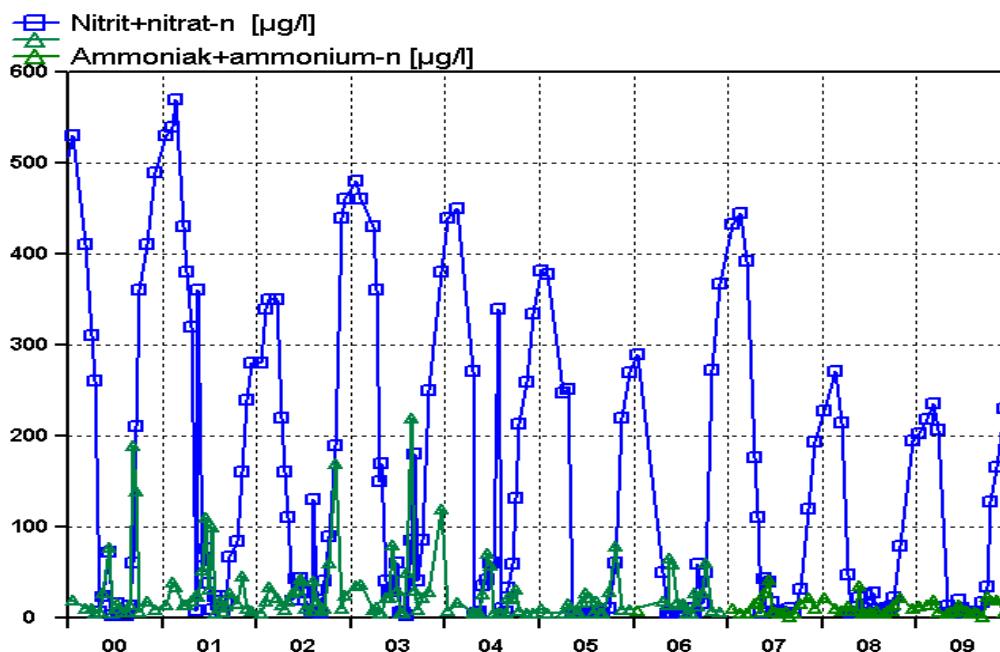
Som det fremgår af Figur 5-2 varierer mængden af tilgængeligt fosfor en del over året. De laveste værdier findes i sommerhalvåret og skyldes at algerne til deres vækst optager den tilgængelige fosfor fra vandfasen. En del af dette fosfor genfindes derefter i puljen "totalfosfor", og en del af dette synker siden ud og indgår sedimentpuljen. Figuren viser overordnet set, at fosforkoncentrationen har været særligt lavt i somrene 2005-2007. De lave koncentrationer har sandsynligvis begrænset algevæksten i perioder.



Figur 5-3 Sommergennemsnit (1/5-30/9) af tilgængeligt fosfor (orthofosfat) 2000-2009.

Figur 5-3 viser gennemsnitsværdien samt minimum og maksimum i sommerhalvåret. Af figuren fremgår det tydeligt at koncentrationen af tilgængeligt fosfor er lavere i 2005-2007 end de øvrige år, men at koncentrationen steg igen i 2008 og 2009.

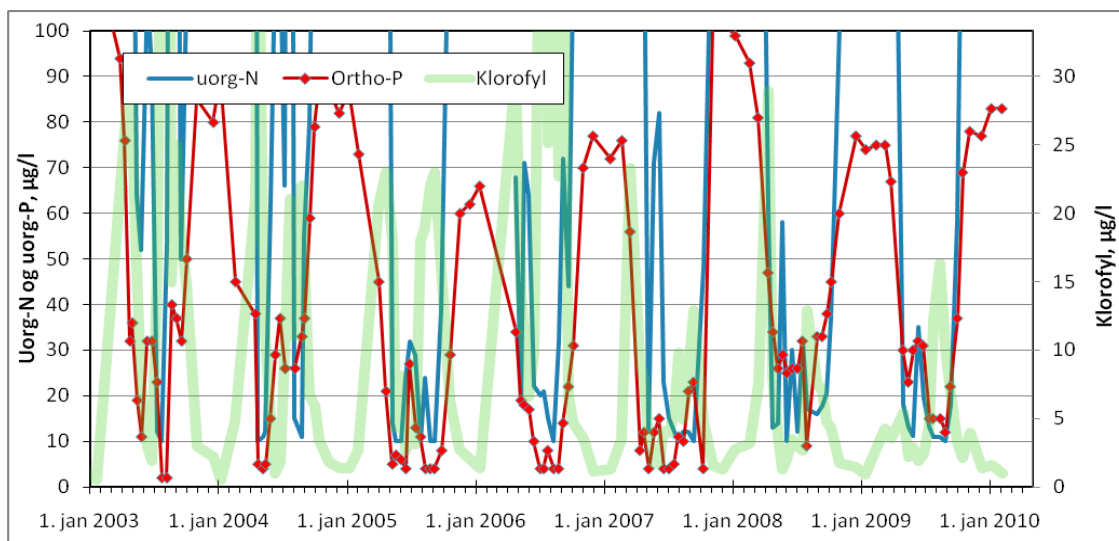
Fosfor har efter al sandsynlighed ikke alene været begrænsende for algernes vækst de seneste 2 år, og kan dermed ikke forklare de historisk lave klorofylniveauer. Til gengæld har koncentrationen af tilgængeligt kvælstof, dvs. ammonium, nitrit og nitrat været meget lav og formodentlig været den vigtigste begrænsende faktor for algevæksten, se Figur 5-4.



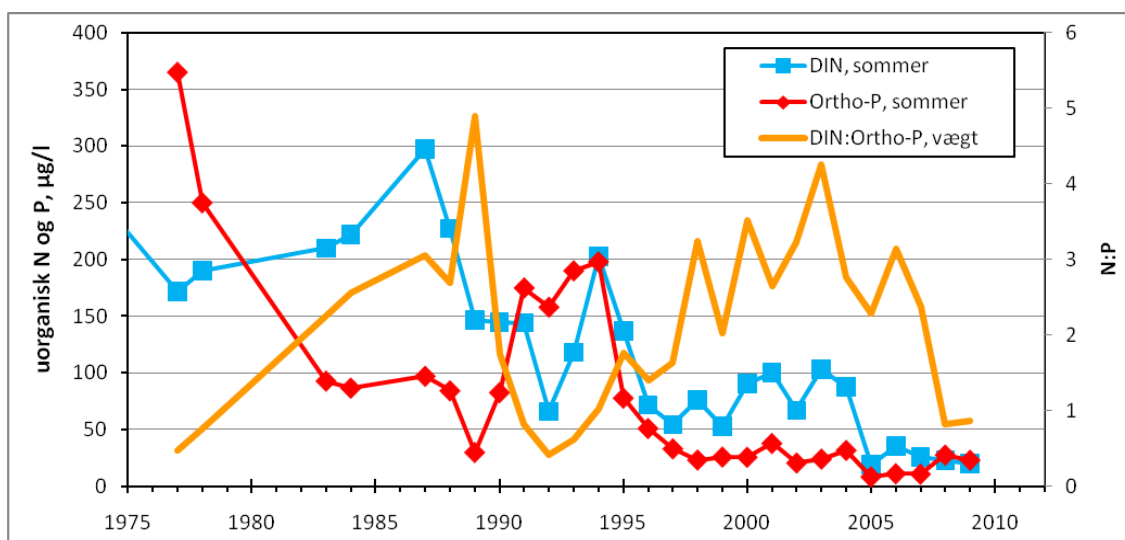
Figur 5-4 Årstidsvariationen af tilgængeligt kvælstof (ammonium, nitrit og nitrat) 2000-2009 i overfladevandet.

Af Figur 5-5 fremgår det at mængden af tilgængeligt kvælstof er meget lavt igennem en længere periode i sommeren 2005, og at samme tendens ses i de følgende år, især i 2008 og 2009 hvor sommerværdierne er stabilt lave. Figuren viser også at både uorganisk fosfor og kvælstof begge er nede på så lave niveauer at de begge i perioder er begrænsende. Alger bruger kvælstof og fosfor i et forhold på ca. 7:1 og især kvælstof er stærkt begrænsende for algevæksten i de fundne sommerkoncentrationer på 10 – 30 µg/l.

Betragter man udviklingen i tilgængeligt fosfor og kvælstof i vækstsæsonen over en længere årrække (Figur 5-5) har de begge to været faldende siden spildevandet blev afskåret i midten af 70'erne og de er nu på et niveau, hvor de hver især kan være begrænsende for væksten. Ser man på forholdet mellem tilgængeligt kvælstof og tilgængeligt fosfor (N:P-forholdet), så har det altid været lavt, dvs. under 7. Igenem 90'erne var der en stigende tendens, men ved iltningens start begyndte forholdet at falde, hvilket vil sige at kvælstofindholdet reduceres stærkere end fosforindholdet. Fra 2005, hvor begge stoffer falder til meget lave koncentrationer, falder N:P forholdet stærkt og ender tæt på 1,0, hvilket indikerer stærk kvælstofbegrænsning.



Figur 5-5 Årstidsvariationen i tilgængeligt fosfor (orthofosfat-P) og kvælstof (summen af ammonium-, nitrit- og nitrat-N) i overfladevandet i Furesø 2004-2009, med fokus på sommerværdierne illustreret med klorofylkoncentrationen som baggrund.



Figur 5-6 Udviklingen i gennemsnitssommerkoncentrationen af tilgængelig fosfor (ortho-P) og kvælstof (DIN) og i N:P-forholdet over en årrække.

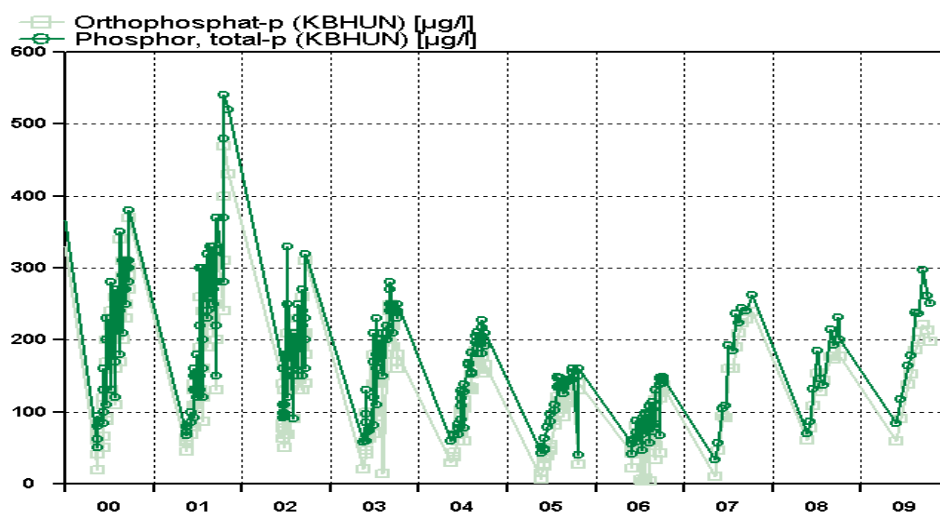
Mens de lave fosforværdier i søen formentlig er hjulpet på vej eller fastholdt af iltningen af bundvandet, er kvælstofdynamikken mindre klar. En lavere ekstern belastning (den afskærende ledning i 1975, samt etablering af kvælstoffjernelse på Stavnsholt i 1993) er selvfølgelig en del af forklaringen, og måske også forklaringen på vedvarende fald gennem 90'erne. De sidste års mere dramatiske fald i uorganisk kvælstof kan skyldes en øget denitrifikation i forbindelse med de forbedrede iltforhold ved bunden, mindsket N-fixering fra blågrønne alger eller måske et øget optag i den ekspanderende plantebiomasse (se senere). Det kan ikke afgøres på det foreliggende datagrundlag.

Furesø har tidligere haft markante skift både i sigtddybde, og i indholdet af næringsstoffer. Det er ikke usædvanligt for Furesø, at algevæksten har været begrænset af

kvælstof. Dette var også tilfældet i en længere periode i 90`erne /3/. Sådanne skift er også kendt fra andre danske søer, men mekanismerne bag disse skift er endnu ikke klarlagt. Ændringer i den biologiske struktur kan være en af forklaringerne, og nyere undersøgelser tyder på, at en lav kvælstofkoncentration spiller en vigtigere rolle end tidligere antaget for opnåelse og fastholdelse af klarvandede tilstande /2/.

5.2 Fosforindholdet i bundvandet

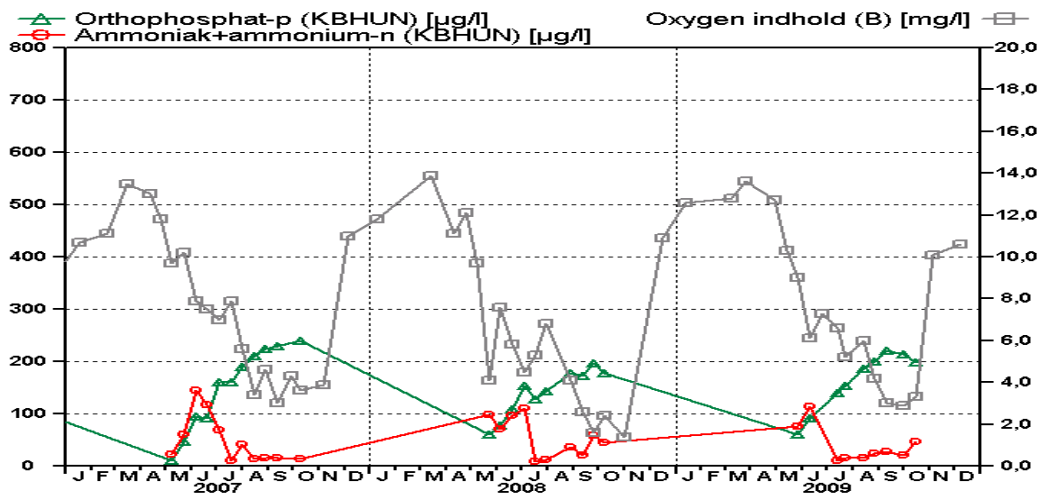
Som det ses af Figur 5-7 er der i alle årene registreret en stigning i fosforindholdet i bundvandet i løbet af sommerperioden. Stigningen var før iltningens start primært forårsaget af frigivelse af jernbundet fosfor i sedimentet under iltfrie forhold. Fra 2003 ilttes mere og mere af sedimentet (også i dybden) med deraf følgende tydelige fald i fosforfrigivelsen.



Figur 5-7 Fosforindhold angivet som både total fosfor og opløst fosfor (orthofosfat) i Furesø i bundvandet 2000-2009.

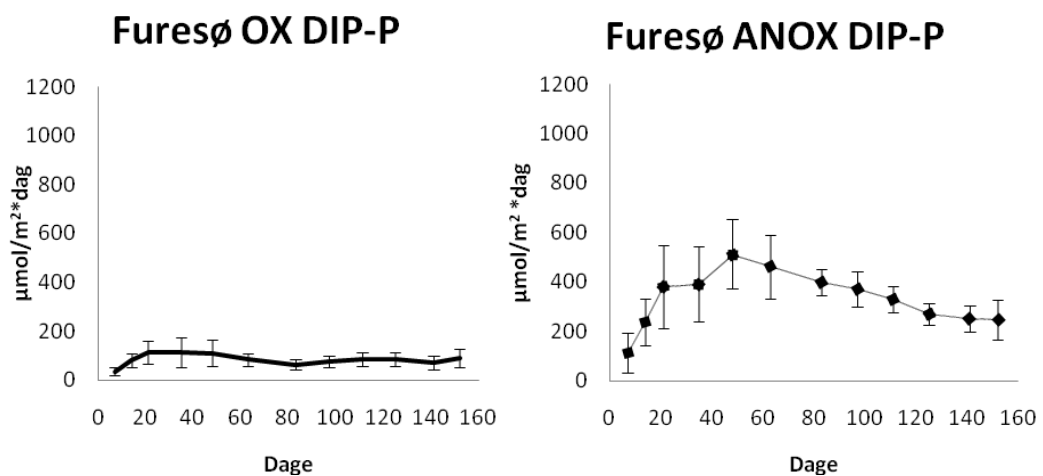
Dog ser det ud til, at der fra 2007 igen sker en øgning i fosforfrigivelsen fra sedimentet, hvilket kan skyldes at sedimentet har en begrænset bindingskapacitet.

Ved nedbrydningen af organisk materiale forbruges der ilt og frigives næringsalte bl.a. fosfor til vandet. Under iltede (oxiderede) forhold bindes fosforet til jernpuljen i sedimentet, men hvis den ved nedbrydningen frigivne fosformængde er større end sedimentets (jernets) bindingskapacitet, så vil fosfor i stedet frigives til vandfasen /1/ og Figur 5-7. At fosforfrigivelsen ikke skyldes iltmangel understøttes af, at ammoniumindholdet i bundvandet som vist på Figur 5-8 også falder i løbet af sommeren, se afsnit 2 for nærmere forklaring.



Figur 5-8 Koncentration af hhv. tilgængeligt fosfor (orthofosfat), ammonium samt ilt i bundvandet i Furesø 2007-2009.

Forsøg med sedimentprøver udtaget i april 2009 af Syddansk Universitet viste at der var meget stor forskel på fosforfrigivelsen fra sedimentet under hhv. iltede og iltfrie forhold. Under iltede forhold var der en lille men konstant frigivelse af fosfor, som stammer fra nedbrydningen af organisk stof. Under de iltfrie forhold øges fosforfrigivelsen væsentligt, jf. Figur 5-9.



Figur 5-9 Frigivelse af fosfor fra sedimentet under hhv. iltede (tv.) og iltfri (th.) forhold i 2009. Grunden til, at frigivelsesraten fra det iltfrie sediment falder efter 50 dage, er formodentlig, at det er et laboratorieeksperiment med en 3 cm sedimentsøjle, hvor der ikke løbende sedimenteres frisk materiale på overfladen og ikke tilføres fosfor fra dybereliggende lag /12/.

5.3 Sedimentundersøgelse

I april 2009 blev der udtaget en sedimentkerne fra søens dybeste sted, den blev analyseret, og resultaterne blev sammenlignet med en tilsvarende prøve udtaget i 1998 /12/ og Figur 5-10.

1998-kernen på ca. 30 cm's længde blev dateret, og det kunne beregnes, at der historisk (40 år tilbage i tiden) havde været en akkumuleringsrate på 1615 g tørstof m^{-2} , 2,50 g fosfor (P) m^{-2} , og 22,5 g jern (Fe) m^{-2} . Den årlige sedimentation svarer til, at sedimentoverfladen årligt tilføres et ca. 1,5 cm tykt lag. På baggrund af under-

søgelse vurderes det, at der blev tilført tilstrækkeligt jern til sedimentet ved sedimentation til at det meste af den mobile P fraktion, tilbageholdes, hvis jern holdes på en oxideret form, f.eks. ved iltning (mobilt P udgjorde ca. 50 % af total P i overfladesedimentet).

I 2009 blev samme station undersøgt og sedimentet analyseret med samme metoder – dog kun ned til 3 cm's dybde. Der blev også målt fosfor- og jernfrigivelse ved in situ betingelser hvad angår temperatur. Effluksene blev målt både under iltede og under iltfri forhold Figur 5-9.

Med hensyn til overfladesedimentets fosfor indhold i de øverste 3 cm er der næsten ikke sket ændringer fra 1998 til 2009. Koncentrationen er faldet fra $31,3 \text{ g P m}^{-2}$ til $27,0 \text{ g P m}^{-2}$ med samme andel af potentielt mobilt P i 2009 som i 1998. Det meste af den mobile P er bundet til oxideret jern. Den største ændring findes i puljen af oxideret jern, som er vokset fra $18,3 \text{ g m}^{-2}$ i 1998 til $46,4 \text{ g m}^{-2}$ i 2009. Også puljen af totalt jern er vokset i 0-3 cm's dybde.

Overfladesedimentet fra 2009 kan ikke sammenlignes direkte med overfladesedimentet fra 1998 i denne undersøgelse, idet den gamle overflade nu ligger i ca. 14 cm's dybde. Alligevel fremtræder de to sedimenter forbavsende ens hvad angår puljen af mobilt P og totalt P. Der er derimod sket en forøgelse af jernpuljen i overfladesedimentet og andelen af oxideret jern er også steget. Det betyder, at der er skabt bedre forhold for tilbageholdelse af P i overfladesedimentet så længe jernpuljen er oxideret. Hvis iltningen standses vil der ske en frigivelse af den jernbundne P-pulje; det vurderes at ca. en tiendedel af puljen kan frigives på en sommersæson med 5 måneders iltfrit bundvand. Frigivelse sker ikke kun fra det undersøgte overfladelag (0-3 cm); men også fra dybere liggende sediment. Hvad angår oxideret jern, så tabes knap halvdelen af puljen fra overfladelaget i samme periode. Det kan formodes, at ved standsning af iltningen vil overfladesedimentet miste sin evne til at tilbageholde fosfor i løbet af 2-3 år, og at P-frigivelsen vil accelerere fra år til år.

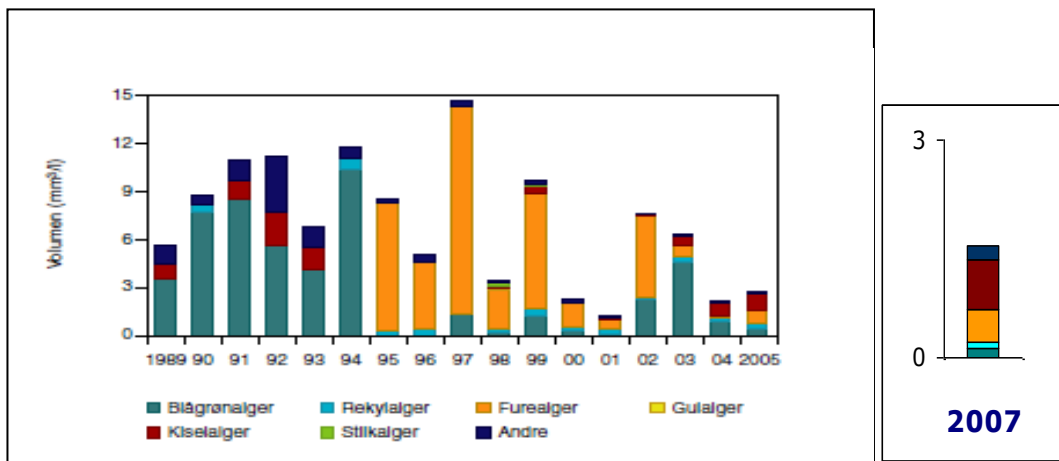
Det er dog påfaldende, at puljen af mobilt (overvejende jernbundet) P ikke er øget som følge af iltningen. Dette kan skyldes, at kun ganske lidt af vandsøjleens fosfor når at sedimentere til bunden på 34 m's dybde. Den samlede pulje af mobilt P på stationen (0-10 cm's dybde) blev i 1998 opgjort til $>15 \text{ g P m}^{-2}$. Hele denne pulje kan blive frigivet hvis iltningen standses /12/.

6 Alger og undervandsvegetation

Grunddata fra tidligere algetællinger og vegetationsundersøgelser har ikke været tilgængelige ved udarbejdelse af nærværende rapport. Derfor er der alene anvendt figurer eller oplysninger, som er hentet fra tidligere afrapporteringer, dog med den undtagelse at data fra vegetationsundersøgelse 2008 er hentet fra STOQ-databasen.

6.1 Planteplankton

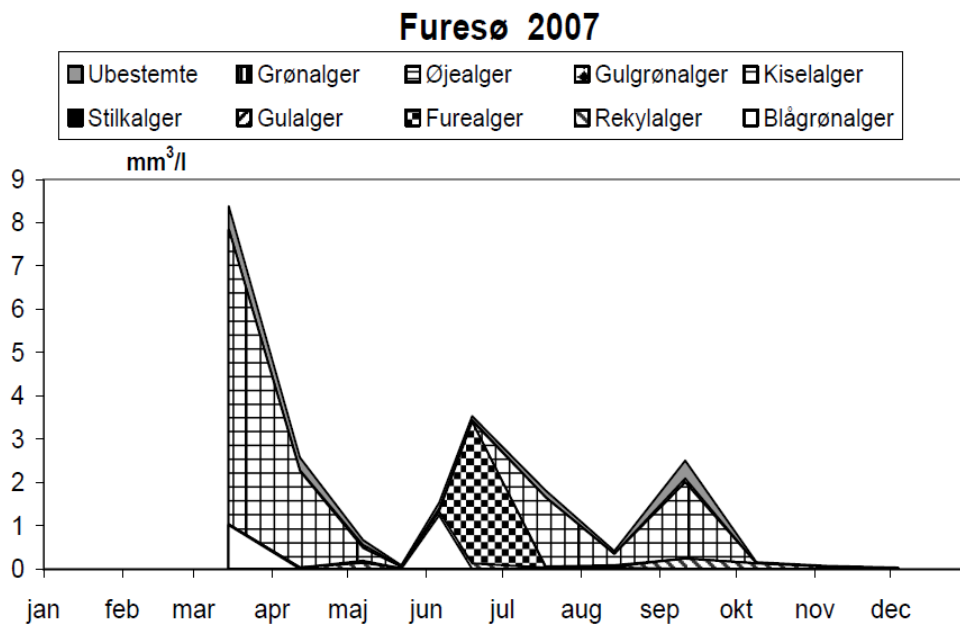
På figur 6.1 sammenholdes den gennemsnitlige algebiomassen i sommerperioden (udtrykt som volumen i mm^3/l) 1999-2005 med 2007. Som det ses har der gennem perioden været en faldende tendens i biomassen, og samtidig er der først sket et skift i planktonsammensætningen fra dominans af de næringskrævende blågrønalger til dominans af furealger og til sidst endnu et skift mod et blandingssamfund af furealger og kiselalger.



Figur 6-1 Planteplanktonets volumenbiomasse og sammensætning i sommerperioden (1. maj til 30. september) 1999-2005 sammenholdt med 2007 /3/ og /9/. Bemærk at der er forskel på skalaen på y-aksen på de to figurer.

Skiftene i planktonsammensætningen må betragtes som positivt. Furealger er mindre tolerant overfor næringssaltbelastning end blågrønalger, og de seneste års blandingssamfund med lave biomasser er et udtryk for at planktonalgesamfundet i Furesø er under udvikling og formentlig kommer til at indeholde arter, der er rentvandsindikatorer og følsomme over for eutrofiering /5/.

Algebiomassen var som gennemsnit i sommerperioden 2007 på $1,52 \text{ mm}^3/\text{l}$, hvilket er meget lavt og det laveste der er registreret siden overvågningen startede i søen i 1989. På baggrund af sigtdybde- og klorofylmålinger fra Furesø 2008 og 2009 (afsnit 4) vurderes det, at algebiomassen begge år var af samme størrelsesorden som i 2007.



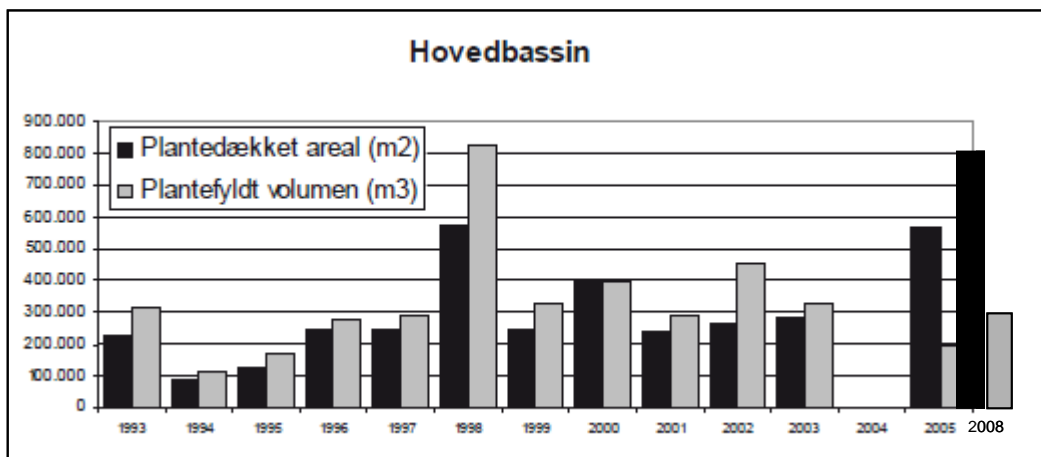
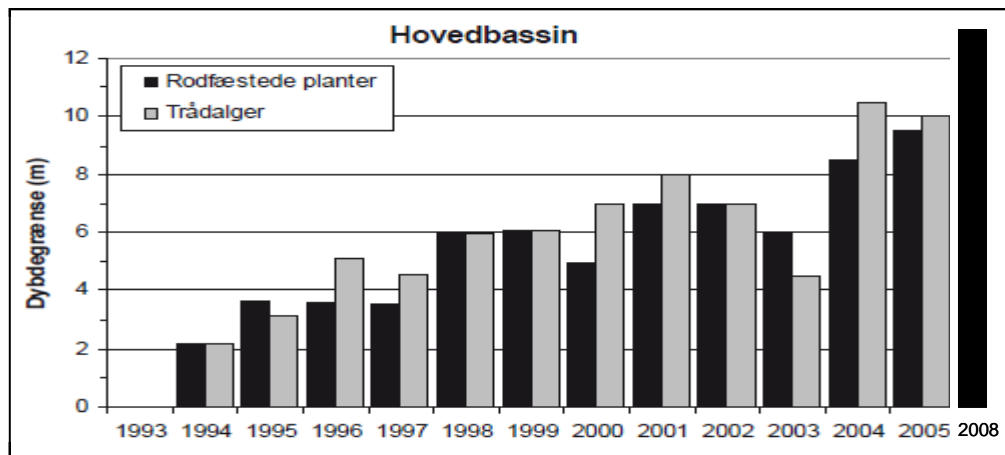
Figur 6-2 Årstidsvariationen i sammensætning af planktonalger i Furesø 2007. Figur hentet fra /9/.

Variationen i planktonalgesammensætning over året i 2007 er vist på Figur 6-2. Den helt dominerende algegruppe, især i foråret inden springlaget blev dannet, var kiselalger. Der var ingen masseopblomstring af blågrønalger i sommerperioden 2007, idet der kun ganske kortvarigt blev registreret en mindre forekomst i juni.

6.2 Undervandsvegetation

Furesøen var engang internationalt kendt for sin udbedte og artsrige undervandsvegetation, men som konsekvens af den stærke eutrofiering forsvandt hovedparten af den unikke vegetation fra søen - både målt i antal arter og i arealudbredelse.

Vegetationsundersøgelse i Furesø viser, at vegetationen, efter at have været trængt tilbage til omkring 2 m's dybde, siden midten af 1990-erne langsom har bredt sig igen i takt med at lysforholdene blev forbedret. Tilstanden har dog været ustabil og bl.a. har den max. 4 m dybe Store Kalv været længe om at blive genbevokset selv om lysforholdene var til stede. Forklaringen er sikkert forringede sedimentforhold /3/. Et af delmålene med restaureringen var derfor at understøtte og sikre undervandsvegetationen, således at den igen ville være udbredt til mindst 6 meters dybde og således at Store Kalv igen ville blive vegetationsdækket.



Figur 6-3 Dybdeudbredelse (øverst) og plantedækket areal i Furesø's hovedbassin 1993-2005 efter /5/. Data fra 2006 er ikke vist på figuren og data for rodfæstede planter fra 2008 er hentet fra STOQ databasen og indføjet på figuren.

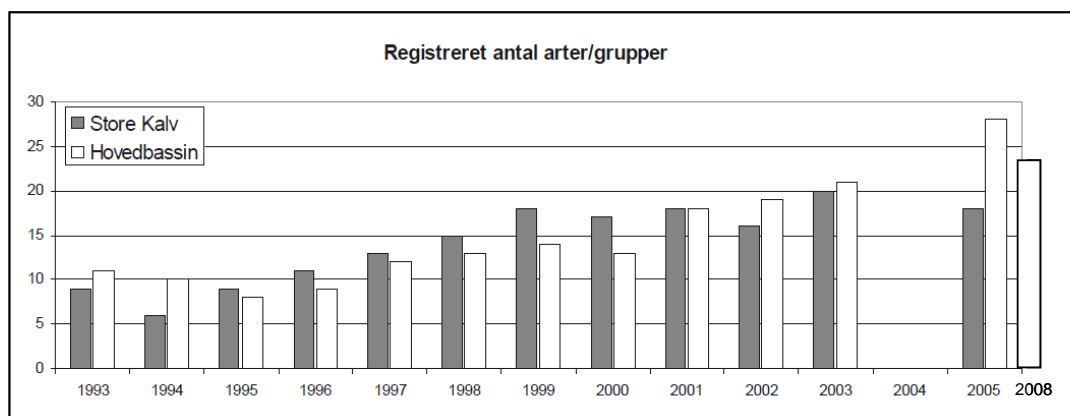
På Figur 6-3 ses udviklingen i vegetationens dybdegrænse, (øverst) og plantedækket areal (nederst), som er et udtryk for hvor tæt vegetationen er. Vegetationen har haft en særdeles positiv udvikling både i udbredelse og i dybdegrænse. I 2006 blev den positive udvikling dog midlertidig brudt /4/. Sommeren 2006 var udsædvanlig varm, hvilket medførte en tidlig og stor opblomstring af blågrønalger i Furesø. Sigtdybden i Furesø var på intet tidspunkt i sommermånederne juni, juli og august 2006 over 2m, og i en lang periode var sigtdybden under 1 m. Lyset blev dermed allerede på et tidligt tidspunkt slukket for undervandsvegetationen. Ved vegetationsundersøgelsen fandtes der ikke undervandsvegetation på dybder over 5,8 m, og også artsantallet var gået voldsomt tilbage i forhold til året før. Dette på trods af at både iltningens og opfiskningens hovedformål synes opfyldt. Forholdene er/var forsat ustabile, og en usædvanlig vejrmæssig sæson kan stadig forstyrre mange års positive udvikling. Tilbageslaget har dog ikke været langvarigt.

I 2008 dækkede undervandsvegetationen en større del af søbunden end registreret tidligere. Endvidere blev der registreret en rekord-dybdegrænse på 13,5 m for rodfæstet vegetation. Det er aldrig registreret før – heller ikke i forrige århundrede. Det skal dog retfærdigvis tilføjes at de nyere undersøgelser er foretaget med dykker, mens de gamle undersøgelser blev foretaget med kasterive. Selv med rekord-

sigtedybden i 2008 er det dog svært at forklare så stor en dybdeudbredelse. I følge /11/ kan man på baggrund af data indsamlet fra Furesø siden 1911 opstille følgende sammenhæng mellem vegetationens dybdegrænse og sommersigtedybden for Furesø:

$$\text{Dybdegrænse} = 6,29 \cdot \ln(\text{gennemsnitssommersigtedybde}) - 1,64.$$

Da sommersigtedybden 2007-2008 er ca. 5 meter, kan det på baggrund af ovenstående formel forventes at vegetationens dybdegrænse vil være omkring 8,5 meter. Dybdegrænse opfylder under alle omstændigheder rigeligt restaureringens mål med hensyn til undervandsvegetation. Store Kalv har siden 2006 ikke indgået i overvågningsprogrammet for Furesø, men selvom der ikke er direkte målinger, tyder iagttagelser på, at hele Store Kalv (der er op til 4 m dyb og dækker ca. $\frac{1}{5}$ af søens areal) nu (2009) er dækket af rodfæstet vegetation.



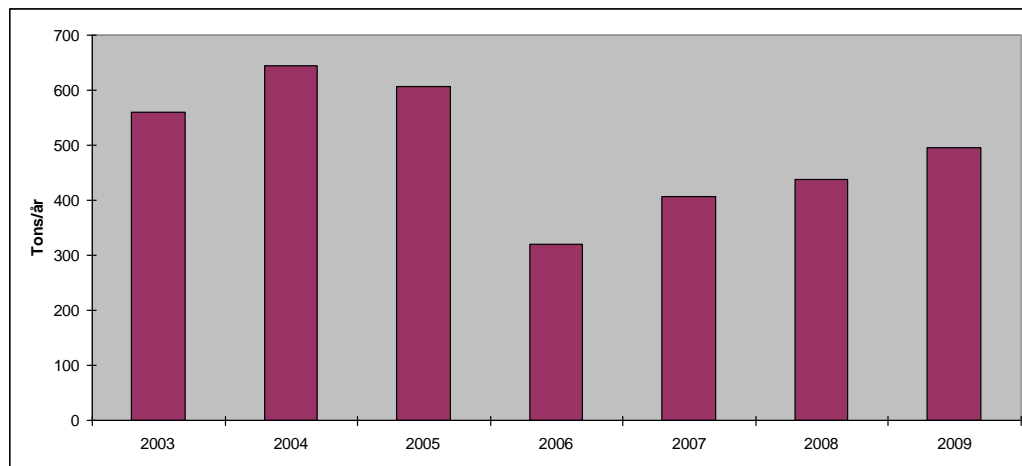
Figur 6-4 Antallet af registrerede arter/grupper af undervandsvegetation i Furesøens hovedbassin 1993-2005 (efter /5/) samt i 2008.

Sammen med dybdegrænse og arealudbredelse har også artsantallet været stigende siden 90'erne. På Figur 6-4 ses antallet af registrerede arter/grupper. I 2005 blev registreret i alt 27 forskellige arter/taxa. I 2008 blev der registret 23 forskellige arter/taxa (trådalger indgår ikke i optællingen). Artsantallet i 2008 er stort set det samme i 2003 og 2005. Forskellen i det registrerede artsantal tilskrives især, at niveauet for arts/slægts bestemmelserne ikke er foretaget helt ens de to år

På baggrund af vegetationsundersøgelsen 2008 kan det konkluderes at vegetationen i Furesø har gennemgået en særdeles positiv udvikling.

7 Konklusion og forslag til iltningsstrategi

Furesø har siden restaureringens start i 2003 haft en fortsat positiv udvikling. Det har især vist sig i de sidste tre år, hvor søen har skiftet til en markant mere klarvandet tilstand samtidig med, at vegetationen har bredt sig til store dybder. Siden iltudledningens start er det stort set lykkedes at opnå iltede forhold i bundvandet, og udfordringen har været at finde en balance mellem et fornuftigt iltindhold i søen og udledning af ilt.



Figur 7-1 Den totale mængde tilført ilt i årene 2003 - 2009.

Erfaringsmæssigt er det muligt at skruer ned for ilttilførslen til søer efter nogle år, ligesom det blev gjort i Furesø fra 2006. Data fra 2008 kunne dog tyde på, at ilttilførslingen i 2008 har været i underkanten. Derfor blev der skruet op for ilttilførslen i 2009. Dette havde som vist i afsnit 3 en positiv effekt på iltindholdet i bundvandet. Ilttilførslen i 2009 var tilstrækkelig stor til at sikre iltede forhold på bunden, og stigningen i fosforindholdet i bundvandet i løbet af sommeren, kan formentlig alene forklares ved nedbrydningen af organiske stof.

De observerede forbedringer i Furesøens tilstand kan dog ikke alene forklares ved restaureringen, der er målrettet mod mindre fosforfrigivelse fra bundsedimentet. Udviklingen i de senere år viser, at også at kvælstofindholdet har en betydende andel i den positive udvikling. Kvælstofindholdet i Furesø faldt markant i 2007 og indholdet af tilgængeligt kvælstof har formentlig været hovedårsagen til den lave klorofylkoncentration i både 2008 og 2009. Om den lave kvælstofkoncentration hænger sammen med iltningen er ikke klart.

De gode iltforhold i bundvandet har medført at levevilkårene for dyrelivet i Furesø er blevet væsentligt forbedret. Selvom det ikke er undersøgt, så er der ingen tvivl om, at både fisk, dyreplankton og ikke mindst de sjældne reliktkrebs har fået øget deres leverum om sommeren. Den biologiske struktur i Furesø har derved haft gode vilkår, hvilket kan være en medvirkende årsag til skiftet til Furesø's klarvandede stade.

Forsøg med iltet/iltfrit sediment viser, at der ligger en stor jernbundet fosforpulje i sedimentet, der vil blive frigjort hvis iltningen stoppes. Selvom søen tilsyneladende nu er kvælstofbegrænset, vil det være risikabelt at stoppe iltningen før årsagen til de lave kvælstofværdier er kendt, og før det har vist sig om søen er stabil i mere end tre år. Udsigterne er til gengæld gode da den ringe planktonproduktion og store plantevækst formodentlig udgør en selvforstærkende stabiliserende mekanisme. Den ringe planktonproduktion og udsynkning bør nedsætte behovet for ilttilskud til bundvandet i fremtiden. Da sedimentet visuelt er blevet beskrevet som værende iltet og iltkoncentrationen generelt er højt i bundvandet vurderes det, at det i 2010 vil være muligt at skrue ned for ilttilførslen til et niveau som i 2007. Der bør dog ligesom i 2009 startes på et lidt højere niveau end i 2007, for at tage højde for omsætningen af det nyligt sedimenterede forårsbloom. Online iltmåling ved bunden vil gøre det muligt at fin-tune ilttilførslen, men udgiften hertil skal vurderes i forhold til størrelsen af en mulig besparelse i iltindkøb.

8 Referencer

- /1/ Furesø Kommune 2009. Furesø 2007 – 2008. Effekt af ilttilførsel. Rapport udarbejdet af Rambøll. 24 pp.
- /2/ Martin Søndergård 2007. Næringsstoffdynamik i søer med fokus på fosfor, sedimentet og restaurering af søer. Doktordisputats.
- /3/ Københavns Amt 2005. Furesø, status og udvikling.
- /4/ Lone Liboriussen et al. 2007. Sørestaurering i Danmark, faglig rapport fra DMU nr. 636.
- /5/ Frederiksborg Amt, Farum kommune og LIFE 2006. Restaurering af Furesø- en næringsrig sø nær København. Konferencemateriale.
- /6/ Miljøministeriet 2010. Udkast til Vandplan 2010-2015. Hovedvandopland 2.3 Øresund. Januar 2010.
- /7/ Lone Liboriussen et al. 2009. Effekt of hypolimnetic oxygenation on water quality: results from five Danish Lakes. *Hydrobiologia* 2009, 625: 157-172
- /8/ Fishcon og Carl Bro 2003. Detailprojekt for iltning af Furesø. Fishcon og Carl Bro, 2003
- /9/ Grontmij/Carl Bro 2008. Furesø Fytoplankton og zooplankton 2007. Udarbejdet for Miljøcenter Roskilde.
- /10/ Lauridsen et al. 2005. Undersøgelser i søer - NOVANA. Teknisk anvisning fra DMU nr. 22. 234 pp.
- /11/ Kaj Sand-Jensen et al. 2008. 100 years history of vegetation decline and recovery in lake Fure, Denmark. *Journal of Ecology*. 96, 2:260-271.
- /12/ Henning S. Jensen 2010. Notat om sedimentforholdene i Furesøen. Sammenligning af sedimentprøver fra 1998 og 2009. 1998-analyserne udført af H.S. Jensen og 2009-analyserne af Maria Jensen. Begge fra Syddansk Universitet. Undersøgelsen i 2009 er finansieret af CLEAR (Center for Sørestaurering, SDU)