

Til
Furesø, Lyngby-Taarbæk og Rudersdal Kommuner

Dokumenttype
Rapport

Dato
November 2018

Furesøs miljøtilstand 2017

Effekten af iltilførsel 2003-2017



Furesøs miljøtilstand 2017

Revision **6.0**
Dato **2018-11-20**
Udarbejdet af **Ole Geertz-Hansen, Kaj Sand Jensen**
Kontrolleret af **OGH**
Godkendt af **OGH**

INDHOLD

0.	Sammenfatning	1
1.	Indledning	4
1.1	Baggrund	4
1.2	Furesø-restaureringen	6
1.3	Datagrundlag	7
2.	Ilt	9
2.1	Baggrund for iltforbrug - processer ved omsætning af organisk stof	9
2.2	Iltindhold og ilttilførsel i Furesø 2003-2017	9
3.	Klorofyl og sigtddybde	12
4.	Fosfor og kvælstofdynamik	13
4.1	Overfladevand	13
4.2	Fosfor og kvælstof i bundvandet	14
4.3	Uorganiske næringssalte i overfladevandet	16
4.4	Begrænsende næringssalte	16
5.	Alger og undervandsvegetation	17
5.1	Planteplankton	17
5.2	Undervandsvegetation	18
6.	Bundfauna	20
7.	Fisk	23
8.	Sediment	24
8.1	Næringssaltomsætning og -tilbageholdelse i sedimentet	25
8.2	Sedimentanalyser	26
9.	Næringsbelastning	30
10.	Hvad sker der, hvis der slukkes for ilten?	31
11.	Konklusion og anbefalinger	33
11.1	Furesøs tilstand og hidtidige udvikling	33
11.2	Fremtidig udvikling og anbefaling	34
11.3	Monitering	35
12.	Referencer	35

0. SAMMENFATNING

Baggrund

Furesø har været gennem en turbulent udvikling siden starten af 1900-tallet. Byudvikling, indførelse af vandskylende toiletter, brug af fosfatholdige vaskemidler, kloakering og ingen spildevandsrensning medførte en stigende forurening af Furesø. Forureningen øgedes dramatisk med velstandsstigningen efter 2. Verdenskrig. Søen havde tidligere været klarvandet og huset en rig undervandsflora, men blev nu uklar af mange planktonalger og lejlighedsvis opblomstringer af blågrønalger, ilten forsvandt i de dybere dele af søen om sommeren, og undervandsfloraen blev stærkt forarmet. Det er især spildevandets indhold af fosfor, der var årsag til den negative udvikling. Fosfor virker sammen med kvælstof som gødning for planktonalgerne.

I 1970'erne blev renseanlæggene med afløb til søen tilsluttet en spildevandsledning, der ledte spildevandet uden om søen. Kun Stavnsholt Renseanlæg havde fortsat afløb til søen, men anlægget blev udbygget og forbedret. Spildevandsbelastningen af Furesø og udledningen af fosfor faldt drastisk fra 35 til 5 tons fosfor om året. Siden er der løbende sket forbedringer og overløb fra kloaknettet er reduceret. Udledningen af fosfor til Furesøen er nu nede på omkring 1,5 tons fosfor per år, nogenlunde det samme niveau som i år 1900. Alligevel er søen ikke blevet klar igen. Det skyldes, at en stor del af den fosfor, der tidligere blev ledt ud i søen, stadig ligger på bunden og langsomt afgives til søvandet og gøder algerne.

Gode og onde cirkler

Så længe fosforen ligger på bunden gør den ikke meget skade, og begravnes langsomt over tid. Men de mange planktonalger i Furesø synker ned på bunden, og når de omsættes af dyr og bakterier bruger de ilt, og bundvandet bliver iltfrit om sommeren. I rene søer er en stor del af fosforen på bunden af søen bundet til jernforbindelser. Når ilten forsvinder brydes disse forbindelser og fosforen bliver opløst i søvandet. Her virker den som yderligere gødning for algerne, der vokser, dør, synker ned og bruger mere ilt. Processen er en selvforstærkende, "ond" cirkel.

Med tiden vil den frigivne fosfor vaskes ud af søen gennem afløbet og andet vil blive begravet dybt i søbunden, og er tilførslen af ny fosfor tilstrækkelig lav, vil den onde cirkel under alle omstændigheder blive brudt og erstattet med en "god" cirkel. Algerne vokser langsommere, der synker færre alger ned, der bruges mindre ilt, og der frigives derfor mindre fosfor.

Fosforen, på bunden af Furesø, vaskes kun langsomt ud af søen; gennemløbet af vand er ikke stort, og det tager 10-15 år før al vandet er udskiftet blot én enkelt gang.

Sørestaureringsprojektet

Furesøen havde længe været fastholdt i en ond cirkel med stor fosforfrigivelse fra bunden. Tanken med at restaurere søen var, at tilførslen af ny fosfor var blevet så lav, at det skulle være muligt at bryde den onde cirkel og etablere en selvopretholdende god cirkel. Man har derfor udledt ilt i bundvandet for på denne måde at nedsætte frigivelsen af det ophobede fosfor fra bunden. Samtidig valgte

man også at opfiske skalle og brasen og derved styrke rovfiskene, især aborre og gedde. Ideen var, at flere rovfisk skulle æde de fisk, som æder dyreplanktonet, som ellers kunne æde planktonalger.

Projektet, der blev etableret af daværende Frederiksborg Amt og Farum Kommune, består i, at der fra en beholder ved Stavnsholt Renseanlæg udledes 300-600 tons ilt pr. år gennem tre diffusoranlæg på bunden af søen, sommer og efterår. Udledningen begyndte i 2003 og samtidig blev der over tre år opfisket 200 tons skaller og brasen. Oprindeligt havde projektet en tidshorizont på 10 år, og man forventede at kunne nedtrappe ilttilførslen over perioden.

Hvordan er det så gået?

Da restaureringen blev sat i gang var søen inde i en positiv udvikling og det er svært at se, om de positive resultater i de første par år er en følge af den naturlige udvikling i søen, eller om det skyldtes restaureringsprojektet. Det er dog klart, at selve iltningen er vellykket, og det er lykkedes at holde iltniveauet i bundvandet oppe på et passende niveau hele sommeren. Der er kommet flere bunddyr og flere fisk af den ønskede slags. Det har ikke været muligt at se en tydelig udvikling i bundens kemiske sammensætning eller i fosforfrigivelsen til bundvandet efter iltningen blev indledt. De første år så det positivt ud, men i de senere år har fosforindholdet i bundvandet været stigende, og det er nu af samme størrelse som for 15 år siden. Det samme gælder mængden af planktonalger og dermed vandets klarhed, som ikke er tydeligt forbedret.

Anbefalinger

Som en direkte konsekvens af iltningen, er der nu gode iltforhold ved bunden og dermed gode forhold for bunddyr og fisk. Med hensyn til den generelle vandkvalitet, lysforhold og forholdene for vandplanterne er der imidlertid ikke opnået stabile og vedvarende forbedringer. Der er heller ikke tegn på, at det vil ske inden for en kortere årrække. Tilførslen udefra af fosfor, især belastningen med spildevand, er nu bragt ned til et så lavt niveau, at søen burde kunne opfylde de vedtagne mål med sørestaureringen, hvis den ikke var belastet af en stor intern fosforpulje.

Vi vil derfor foreslå, at man stopper iltningen og lader søen udvikle sig naturligt. Det er muligt, at søen vil vende tilbage til den relativt gode udvikling, den var inde i, allerede inden iltningen begyndte. Men der er omvendt også en risiko for, vandkvaliteten indledningsvis forringes, når ilten forsvinder.

Furesø er en meget kompleks sø. Ligesom det ikke har været muligt at forudsige virkningerne af det igangværende restaureringstiltag, vil det heller ikke være muligt at forudsige, hvornår vandkvaliteten vil opfylde den gældende målsætning i Vandområdeplan 2015-2021 for Vandområdedistrikt Sjælland, hvis man stopper iltningen nu. Vi vurderer alligevel, at det vil være fornuftigt og forsvarligt at stoppe iltningen, idet den eksterne fosforbelastning er bragt ned, og idet der er ikke tegn på at iltningen har medført en ekstraordinær ophobning af fosfor i sedimentet.

En mulig "blød" overgang kunne være at trappe iltningen ned over et par år, således at fiskene stadig i nogen grad kan udnytte bundens fødekilder. Herved får fiskebestanden mulighed for at indstille sig til et mere begrænset rum og fødeudbud, når bundvandet på de dybe steder om sommeren bliver utilgængelig som følge af de dårligere iltforhold. Man ville også med denne bløde overgang få mulighed for at følge de vandkemiske parametre og gribe ind, hvis udviklingen skulle gå anderledes

end forventet. Den mulighed ville man også have, hvis man blot slukkede for ilten uden at fjerne iltningens anlægget, men samtidig fulgte udviklingen i søens miljøtilstand gennem et tæt overvågningsprogram.

Vi vil under alle omstændigheder anbefale et tæt overvågningsprogram. Dermed vil man i tide kunne genoptage iltningen, hvis miljøtilstanden forværres på en måde, som kan afhjælpes med ilttilførsel.

1. INDLEDNING

Formålet med nærværende rapport er først at give en oversigt over Furesøs udvikling og en status over den nuværende miljøtilstand. På denne baggrund vurderes effekten af det pågående iltning-program samt konsekvenserne, hvis iltningen stoppes.

Første del af rapporten, status over Furesøs nuværende miljøtilstand, er i al væsentlighed en opdatering af de rapporter, der er udarbejdet efter iltningen af bundvandet blev indledt i 2003 /9-12/.

Anden del er en vurdering af effekten af iltningen, og vurdering af, hvad der vil ske, hvis iltningen indstilles.

Rapporten afsluttes med en anbefaling til den fremtidige forvaltning af søen.

1.1 Baggrund

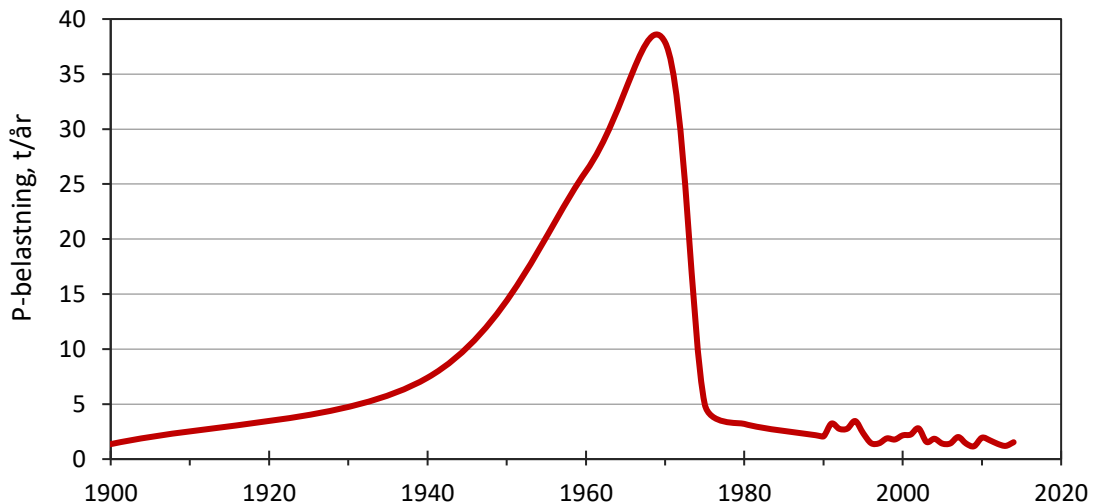
Furesø er Danmarks dybeste sø og var indtil starten af 1900-tallet en klarvandet sø, som var berømt for sin usædvanlig artsrige vegetation, der var udbredt ned til 8-10 meters dybde. Søen var også kendt for at huse tre såkaldte istidsrelikter. Det drejer sig om store krebsdyr, som man tidligere mente oprindeligt havde levede i ishavet, men efter sidste istid overlevede i enkelte skandinaviske søer.

I løbet af 1900-tallet tidobledes befolkningstallet i Furesøs opland, vandskylende toiletter blev indført og man begyndte at bruge fosfatholdige vaskemidler. Spildevandet blev ledt stort set urensset ud i søen, der blev uklar som følge af voldsom algevækst. I 1960'erne var der kun ca. en tredjedel af bundplantearterne tilbage, ét af "reliktkrebsdyrene" var forsvundet og de øvrige havde svære vilkår pga. udbredt iltsvind i det kolde bundvand om sommeren.

Årsagen til udviklingen er den, at næringsstofferne (fosfor og kvælstof) i spildevandet virker som gødning for planktonalger. En stor algemængde skygger for lyset, så bundplanter ikke længere kan vokse på store dybder. Når algerne dør, synker de ned på bunden og bliver nedbrudt under forbrug af ilt i bundvandet. Ved nedbrydningen af algerne frigives bl.a. fosfor, som dog under iltede forhold i et vist omfang forbliver kemisk bundet i sedimentet til iltet jern. Men når ilten forsvinder, frigives en stor del af denne fosfor til vandet. Dermed forværres situationen yderligere. Iltfrie bundforhold betyder desuden også dårligere levevilkår og fødeudbud for fiskene - alt i alt væsentlige ændringer af de økologiske forhold.

I midten af 1970'erne blev der indført forbedret rensning og fosforfjernelse på Stavnsholt rensesanlæg, mens hovedparten af det rensede spildevand fra de øvrige rensesanlæg omkring Furesø blev ledt uden om søen og direkte til Øresund via en afskærende ledning. Hermed faldt fosfortilledningen til søen fra ca. 35 tons om året til ca. 5 tons. Denne tilførsel er siden reduceret til mindre end 2 tons per år (Figur 1-1). Det svarer nogenlunde til den estimerede fosforbelastning på ca. 1,5 tons i år 1900. Den nuværende belastning skyldes hovedsageligt kloakoverløb ved heftige regnskyl og udledning af spildevand fra spredt bebyggelse uden kloaktilslutning direkte til Furesøen og fra tilløb fra Farum Sø og Vejle Sø.

Ved afledning og rensning af spildevand faldt også kvælstofbelastningen af søen, og i 1993 indførte Stavnsholt yderligere kvælstofrensning. Men i modsætning til fosfor, er der andre og væsentligere kilder til kvælstof end spildevand. Mere end 80 % af den nuværende kvælstofbelastning stammer fra tilførsel fra luften og afstrømning fra det åbne land. Her er Furesø dog godt hjulpet af, at kun en mindre del af oplandet består af landbrug, mens hovedparten er bymæssig bebyggelse, skov og naturområder.



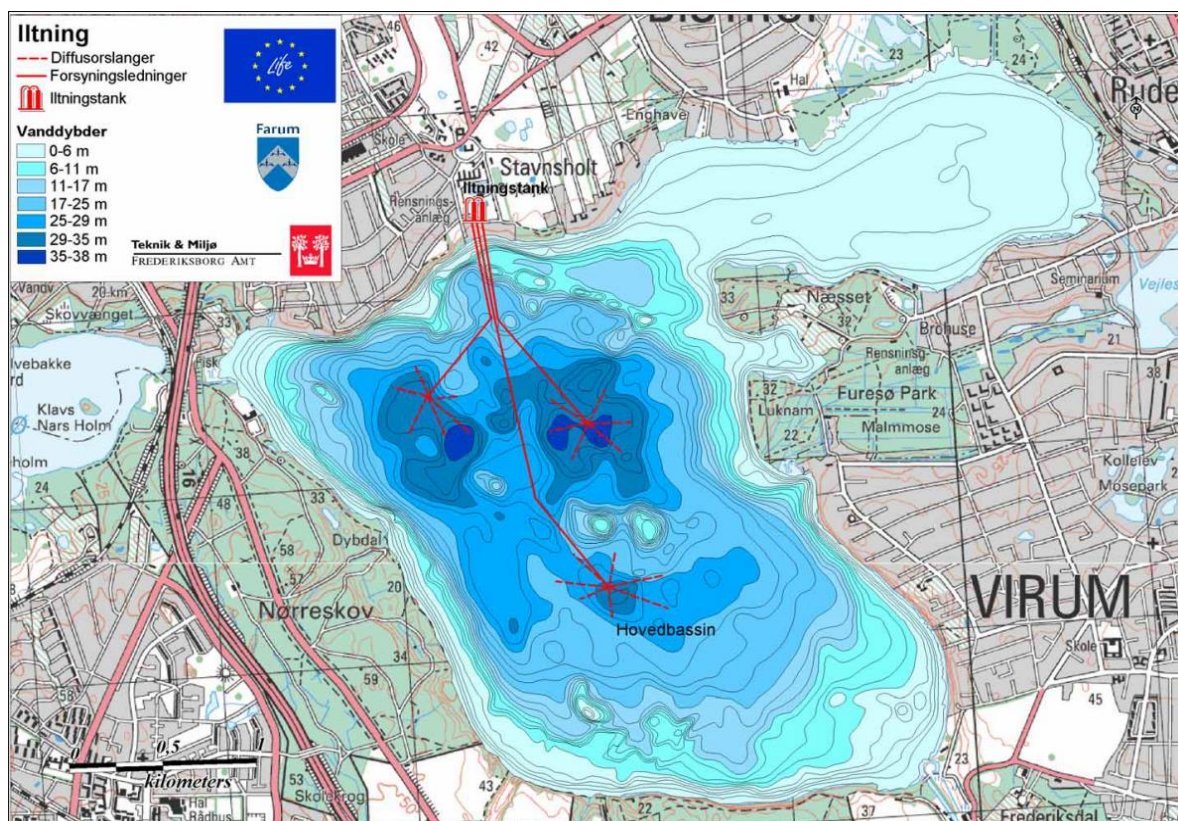
Figur 1-1 Fosforbelastningen af Furesø steg stærkt med bebyggelse og kloakering i søens opland. Stigningen blev først afbrudt midt i 1970'erne, da hovedparten af spildevandet blev ledt uden om søen, og resten blev rensat bedre /1/

Selvom næringsbelastningen er reduceret radikalt, forbedres tilstanden i søen kun langsomt. I midten af 1990'erne vurderes det, at meget store mængder fosfor stadig lå på bunden og blev frigivet hver sommer, når ilten forsvandt. Desuden mente man, at en u hensigtsmæssig sammensat fiskebestand fastholdt søen i en tilstand med mange alger og uklart vand. Da vandet i Furesø har en gennemsnitlig opholdstid på mere end 10 år, blev det dengang vurderet, at det ville vare mange år, før næringsoverskuddet var skyllet ud af søen eller inaktiveret i sedimentet og søen kommet i en ny og bedre tilstand.

Man kan hjælpe processen frem mod en bedre tilstand på vej på forskellig vis. I 2003 blev et EU støttet restaureringsprojekt igangsat af Frederiksborg Amt og Farum Kommune. Projektet havde to hovedelementer:

1. Tilførsel af ilt til bundvandet for primært at forhindre frigivelse af de store mængder fosfor der er bundet til jern i sedimentet, og sekundært for at forbedre forholdene for bunddyr og fisk
2. Manipulering af fiskebestanden ved selektiv opfiskning af især de dyreplanktonspisende fisk, skalle og brasen.

Som led i restaureringen af Furesø er der derfor siden 2003 blevet udledt rent ilt til bundvandet tre steder i søen i sommerhalvåret, som vist på Figur 1-2. Ilttilførslen søges styret således, at der er ilt nok i bundvandet til, at fosfor forbliver bundet i sedimentet, men uden at der opstår unaturligt høje iltkoncentrationer. Siden 2007 har Furesø Kommune stået for driften af iltanlægget, som siden 2013 har været finansieret af Furesø Kommune, Novafos, Rudersdal Kommune og Lyngby-Taarbæk Kommune.



Figur 1-2 Iltningsanlægget i Furesø består af en lagertank for flydende ilt placeret ved Stavsholt Rensningsanlæg forbundet til tre diffusorer placeret i de dybeste af søens bassiner /2/.

1.2 Furesø-restaureringen

Frederiksborg Amt og Farum Kommunes overordnede mål med restaureringen af Furesø var med tiden 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 i vandsøjlen.
2. Sigtdybden skal være større end 4 meter som gennemsnit i sommerperioden.
3. Der må ikke forekomme opblomstringer af blågrønalg.
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.

Hertil kan tilføjes, at klorofylindholdet i Furesø i 2015 i henhold til Vandplanen for 2009-2015 højst måtte være 12 µg/l, svarende til et total-fosfor- og total-kvælstofindhold på maksimalt hhv. 25 µg/l og 0,33 mg/l /3/. I henhold til den nugældende Vandområdeplan for 2015-2021 er miljømålet for Furesø god økologisk tilstand. Det har ikke været muligt, at fastsætte et specifikt klorofylmål for søen. Totalfosfor, som er et indirekte mål (støtteparameter) er fastsat til 29 µg/l. Tidsfristen for opfyldelse af god økologisk tilstand er udskudt til efter 2021 /24, /28/.

Furesø indgår desuden i EF-habitatområdet H123 "Øvre Mølleådal, Furesø og Frederiksdal Skov", samt EF-fuglebeskyttelsesområde F109 "Furesø med Vaserne og Farum Sø", der er en del af det europæiske Natura 2000 netværk. Søens naturtype udpegningsgrundlag er naturtype 3140 (Kalkrige søer og vandhuller med kransnålalger) og 3150 (Næringsrige søer og vandhuller med flydeplanter eller store vandaks). Søen er dermed underlagt særlig beskyttelse mod forringelse.

1.3 Datagrundlag

Effekten af iltningen blev til og med 2006 fulgt af Københavns og Frederiksborg amter. Der foreligger for perioden 2003-2007 en lang række data og rapporter, der sammenfatter resultater fra profilmålinger, sigtddybdemåling (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", dvs. med høj målefrekvens. Programmet er løbende blevet ændret. I alle årene til og med 2015 er der dog som minimum udtaget vandprøver og gennemført målinger på station 1644, som er placeret i hovedbassinet på det dybeste sted i søen. På trods af ændringer i prøvetagningsprogrammet har analyseparametrene været de samme i alle årene, dog er bundvandsprøverne fra og med 2007 kun analyseret som én enkelt blandingsprøve og ikke som tidligere, som en række delprøver i forskellige dybder under springlaget. Frekvensen af plankton-, vegetations- og fiskeundersøgelser har været faldende siden 2007, og fra 2015 bliver der kun udtaget vandprøver hvert andet år. I forbindelse med overvågning og justering af iltningen bliver der dog hvert år målt sigtdybde samt dybdeprofiler af iltindholdet ca. hver anden uge i sommerhalvåret.

Følgende data fra overvågningen er inddraget i nærværende rapport:

- Iltindholdet i vandsøjlen
- Fosfor og kvælstof fra overfladevand og bundvand
- Klorofylindholdet
- Sigtdybdemålinger
- Vegetationsundersøgelser
- Planktonundersøgelser
- Bunddyrsundersøgelser
- Fiskeundersøgelser
- Sedimentundersøgelser

De ovennævnte data er trukket ud fra Miljøportalen, fra databasen STOQ og fra rapporterne /21, /27/.

Endvidere indgår data fra Store Kalv fra Rudersdal Kommune, enkeltstående undersøgelser, videnskabelige artikler, samt ældre data og figurer fra tidligere rapporter i det omfang, det er nødvendigt for at forstå udviklingen i søen.

Tabel 1-1 Oversigt over de forskellige målsætninger for Furesø, siden restaureringen blev sat i gang i 2003 /3, /9, /24, /25, /26/.

Parameter	Regionplan 2005	Restaureringsmål	Vandplanmål 2009-2015	Vandområdeplanmål 2015-2021
Ilt	Ikke under 0,5 mg/l i bundvandet	Gode levevilkår for dyrelivet under springlaget, dvs. ikke under 6 mg/l i vandsøjlen		
Sigt dybde	Ca. 4 m som gennemsnit i perioden juni-august	> 4 m som gennemsnit i sommerperioden		
Fosfor	< 40 µg/l i års- og sommergennemsnit	< 40 µg/l i årsgennemsnit i overfladevandet	< 25 µg/l i sommermiddel (svarer til 27 µg/l i årsgennemsnit jf. /25/)	< 29 µg/l i sommermiddel (svarer til 45 µg/l i årsgennemsnit jf. /25/)
Kvælstof			< 330 µg/l i sommermiddel	
Klorofyl			< 12 µg/l i sommermiddel.	Indgår i Dansk Søplanteplanktonindeks (DSPI), og anvendes alene hvis der ikke er data for planteplankton
Planteplankton		Ingen opblomstringer af blågrønalger		Dansk Søplanteplanktonindeks (DSPI)
Undervandsvegetation	Rankegrøden skal være udbredt over hele Store Kalv, dvs. til dybder > 4 m. Artsantallet i rankegrøden skal øges til at nærme sig det oprindelige	Undervandsvegetationen skal igen kunne vokse på dybder > 6 m		Dansk Søvandplanteindeks (DSVI)
Fisk		En balanceret fiskefaunasammensætning		Dansk Fiskeindeks for søer (DFFS)
Reliktkrebs	De to tilbageblevne arter af reliktkrebs skal forekomme i livskraftige bestande	De tilbageværende reliktkrebs skal forekomme i levedygtige bestande		
EF-Habitatområde	Furesø er beliggende i Habitatområde H 123 og indeholder naturtyperne 3140 og 3150			De nødvendige vandkvalitetsmål er indeholdt i vandplanmålene /29/.
Andet	Naturvidenskabeligt interesseområde, skærpet målsætning A1. Badevandsområde, skærpet målsætning A2			

2. ILT

2.1 Baggrund for iltforbrug - processer ved omsætning af organisk stof

Når søvandet varmes op om foråret og forsommeren, sker opvarmningen hurtigst nær overfladen. Da varmt vand er lettere end koldt vand, ligger det varme overfladelag som et låg, der forhindrer, at overflade- og bundvand blandes, og bundlaget mister kontakt til atmosfæren i hele sommerhalvåret. Skillefladen mellem de to lag, springlaget, ligger i Furesø sædvanligvis i 10-15 meters dybde.

Ilten i bundvandet i Furesø bruges primært til at nedbryde og omsætte det organiske materiale, der fra det produktive overfladelag synker ned på bunden. Omsætningen af stof sker ved en række processer både under aerobe (iltede) forhold og anaerobe (iltfrie) forhold i de øverste cm af sedimentet. Den aerobe nedbrydning af det organiske stof sker ved aktiviteten af bunddyr (myggelarver, børsteorme o.a.) og især bakterier af forskellige typer.

Ilten forbruges imidlertid ikke alene til direkte omsætning af organisk stof. Så længe der er ilt til stede, sker der også en nitrifikation, hvor ammonium (NH_4^+), som dannes ved nedbrydning af organisk stof, oxideres videre over nitrit (NO_2^-) til nitrat (NO_3^-) ved en bakteriel proces. Ilten i bundvandet forbruges også i et vist omfang til at ilte reduceret jern, sulfid og methan, som dannes ved anaerobe nedbrydningsprocesser i sedimentet.

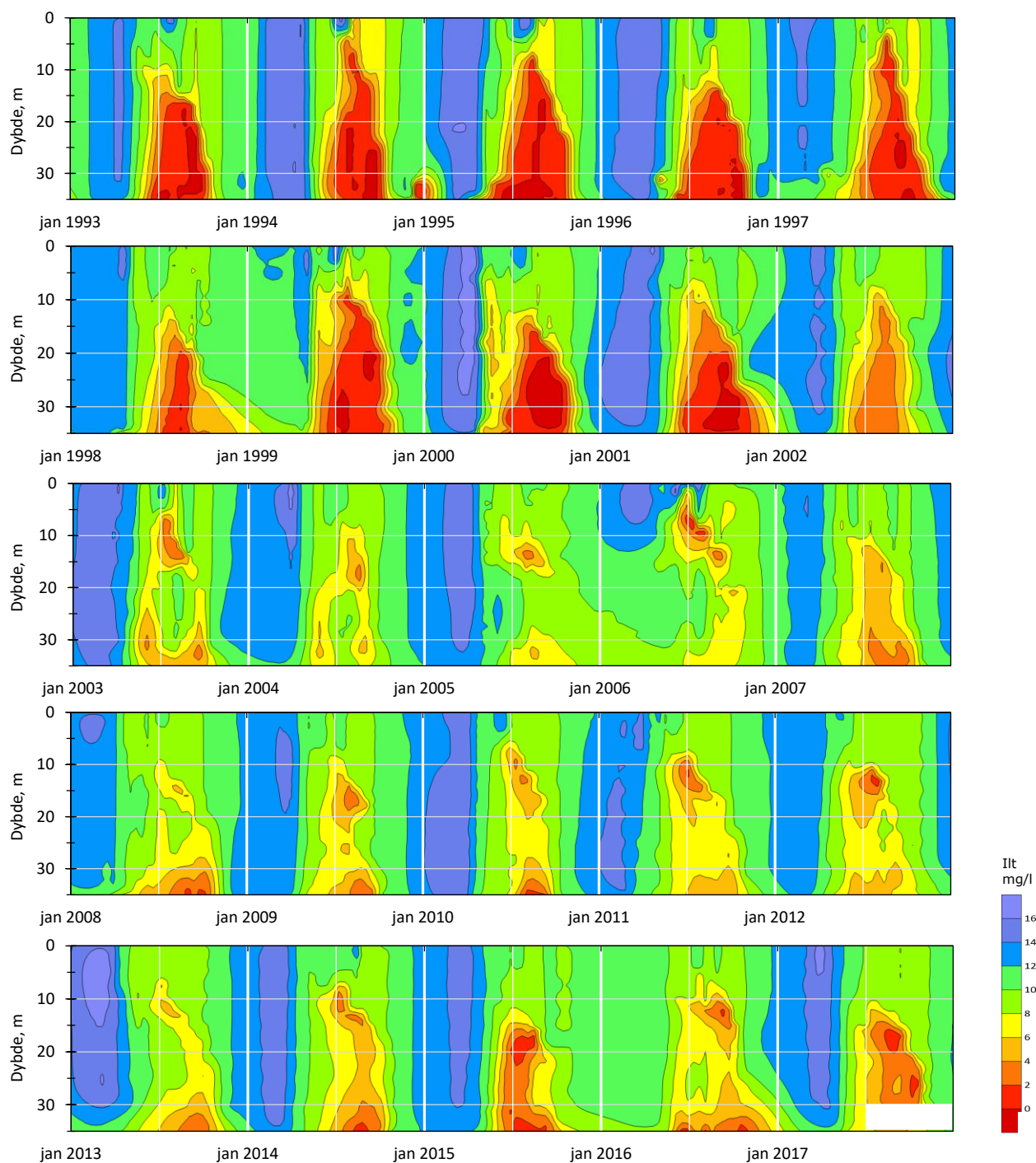
I perioden med lagdelingen er der kun en begrænset mængde ilt til rådighed til de aerobe processer, nemlig den iltmængde, der var i bundvandet, da lagdelingen opstod i foråret. Vandet er normalt så uklart, at der ikke er lys nok til fotosyntese af iltproducerende alge- og plantevækst under springlaget.

Selvom der er ilt i bundvandet, falder iltkoncentrationen normalt til nul i de øverste få mm af sedimentet, og de anaerobe (iltfrie) processer overtager herefter nedbrydningen af det organiske stof dybere i sedimentet. Når der ikke er ilt til stede, sker omsætningen af det organiske stof under reduktion af bl.a. jern, som reduceres fra Fe^{3+} til Fe^{2+} . Under aerobe (iltede) forhold binder jernet fosfat adsorberet til overfladen eller som tungt opløselige forbindelser. Men ved reduktion af jernet til opløseligt Fe^{2+} forsvinder denne bindingsevne og allerede bundet fosfat frigives. Et af de væsentligste mål med iltningen af Furesø er netop at sikre aerobe forhold ved sedimentoverfladen således, at jernets fosfatbindingsevne opretholdes her.

Det kan være vanskeligt at måle iltindholdet ganske tæt på sedimentoverfladen, men ifølge ovenstående må det forventes, at såfremt indholdet af ammonium i bundvandet er lavt, er der ilt nok til at sikre, at der er aerobe forhold ved sedimentoverfladen. Med ilt til stede vil ammonium nemlig iltes til nitrat, men ved mangel på ilt sker det ikke, hvorfor ammonium ophobes.

2.2 Iltindhold og ilttilførsel i Furesø 2003-2017

Furesø har i nu 15 år, dvs. siden 2003 fået tilført ilt til bundvandet i sommerhalvåret. Iltindholdet måles ca. 1 gang om måneden i vinterhalvåret og ca. hver 14. dag om sommeren. Tilførslen af ilt justeres efter disse målinger. På Figur 2-1 ses iltindholdet i Furesø i perioden 1993-2017. De 10 år før iltningen startede er vist til sammenligning.



Figur 2-1 Iltindholdet i Furesø på det dybeste sted for årene 1993-2017. Iltningen startede i 2003. De dybeste målinger kan være usikre, da der ikke måles på samme sted hver gang. I en del af 2017 blev iltindholdet kun målt ned til 30 meters dybde.

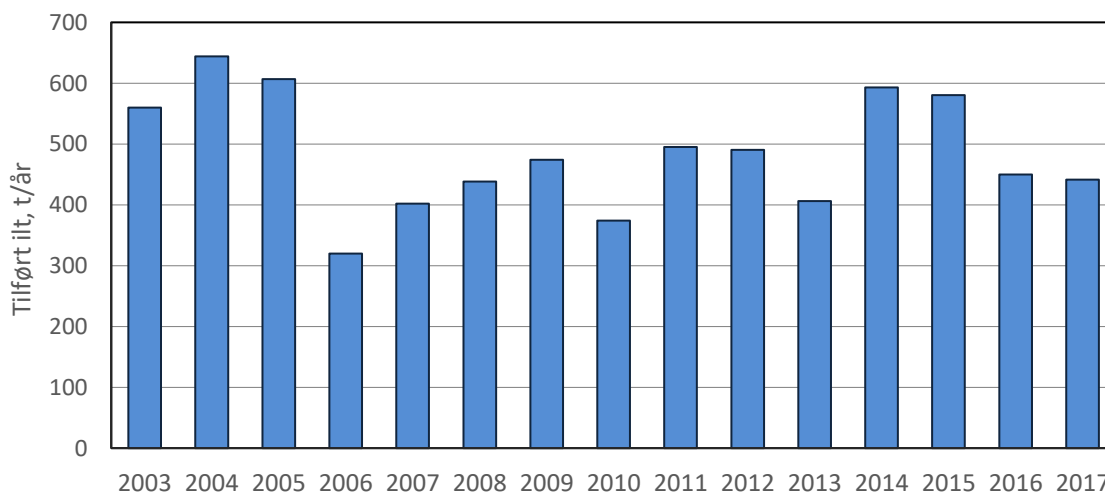
Som det fremgår af figuren, er iltindholdet i Furesø fra top til bund ca. 12-14 mg/l i perioden december til maj, hvor der ikke er springlag i søen. Fra det tidspunkt, hvor springlaget dannes, begynder iltindholdet under springlaget at falde. Hvis ikke der kunstigt tilføres ilt, bruges ilt op i løbet af juli måned, og der opstår iltfrie forhold. De iltfrie forhold består, indtil springlaget nedbrydes i løbet af efteråret. Der er ca. 500 tons ilt i vandmassen under springlaget, når dette dannes.

Ifølge målingerne og Figur 2-1 var der på intet tidspunkt under 2 mg ilt/l i 2002, året før iltningen startede. Det kan være en instrumentfejl, da ammonium og fosfatfrigivelsen opfører sig som om iltforholdene stadig ikke var helt gode – men dog i bedring i forhold til de tidligere år.

Ved at justere tilførslen af ilt er det i de fleste år lykkedes at holde iltniveauet over 6 mg/l i størstedelen af året og mellem 4 og 6 mg/l i størstedelen af vandsøjlen i den kritiske periode i sensommeren. I ingen af årene blev der målt længerevarende iltfrie forhold under springlaget, og iltindholdet vurderes at være tilstrækkeligt til, at både dyreplankton og fisk kan trives under springlaget.

Lige over bunden måles iltindholdet til under 4 mg/l og enkelte gange til under 2 mg/l midt på sommeren, men ikke 0 mg/l på noget tidspunkt. Det er vanskeligt at måle tæt på sedimentet og dybdeangivelsen af den dybeste måling varierer mellem 30 og 37 m fra prøvetagning til prøvetagning. Tæt på bunden er iltgradienten stejl, og forskellen i det målte iltindhold mellem to prøvetagninger er derfor ikke nødvendigvis reel, men kan skyldes mindre forskelle i målingens afstand til bunden.

Selvom der iltes, måles der ofte et meget lavt iltindhold lige omkring springlaget (Figur 2-1). Dette må tilskrives nedsynkende plankton, som ophobes og omsættes her. Udviklingen i iltkoncentrationen i sommerhalvåret i den iltede sø ligner i nogen grad forløbet i en naturligt eutrof eller svagt belastet sø, hvor iltindholdet under springlaget falder i løbet af sommeren, uden at den dog når at blive anaerob ved bunden. Kombinationen af en meget lavt iltkoncentration i springlaget og en relativt høj koncentration i bundvandet ligner dog ikke iltforholdene i noget naturligt system.



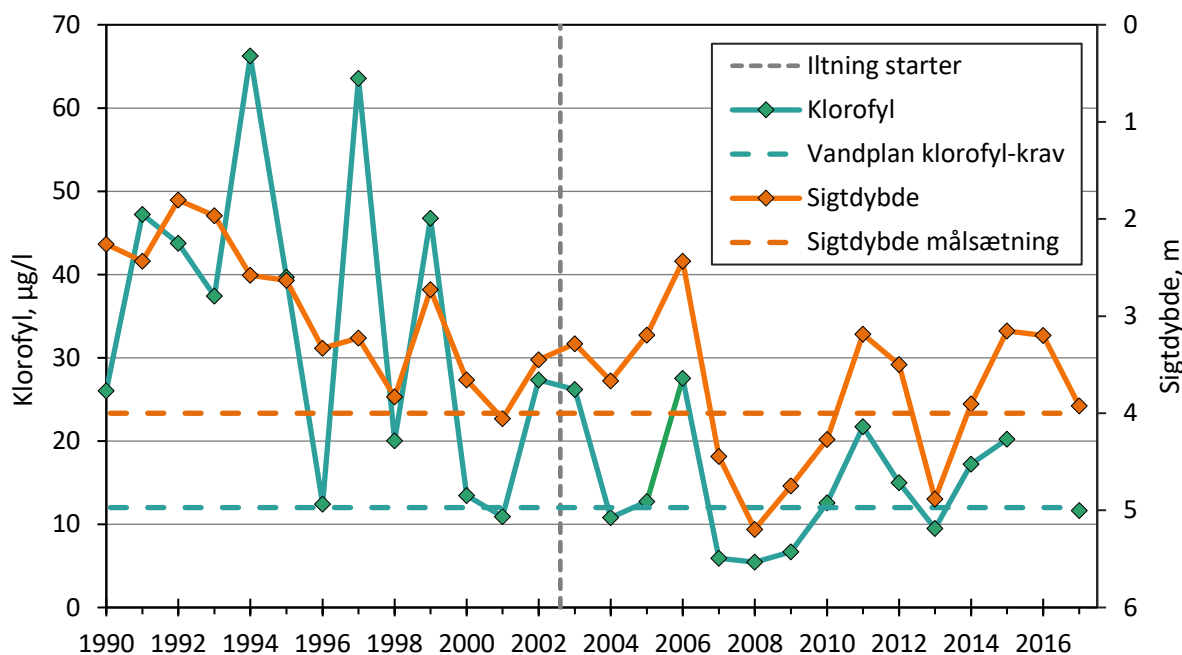
Figur 2-2 Den årlige mængde af flydende ilt tilført til søen.

Fra springlagets dannelse i starten af maj og til dets opløsning i slutningen af oktober er der siden 2003 hvert år tilført mellem ca. 300 og 600 tons ilt (Figur 2-2). Ilttilførslen justeres løbende og toppes typisk sidst på sommeren med 4-5 tons ilt om dagen.

3. KLOROFYL OG SIGTDYBDE

Sigtdybde (vandets klarhed) og klorofylkoncentration (et mål for algemængden) er behandlet under ét, idet der generelt er en god sammenhæng mellem klorofylindholdet og sigtdybden i Furesø; jo lavere klorofylindhold, desto klarere vand.

Den gennemsnitlige sigtdybde og klorofylindhold i sommerperioden (1. maj til 30. september) i Furesø er vist nedenfor i Figur 3-1, og sammenhængen mellem de to parametre er ganske tydelig.



Figur 3-1 Udviklingen i sommergennemsnittet (maj - september) af klorofylkoncentration og sigtdybde. Restaureringsprojektets start i 2003 er markeret, og desuden er kravet i Vandplan 2009-2015 til maksimal klorofylkoncentration vist sammen med restaureringsmålet for sigtdybde. Der er ikke klorofylkrav i Vandområdeplan 2015-2021. Bemærk at sigtdybde-skalaen på højre akse har nulpunktet øverst. Der blev ikke målt klorofyl i 2016.

Betragtes udviklingen i klorofylindhold over en 30-årig periode er der, trods store udsving, sket en tydelig forbedring, fra et niveau på 40-50 µg/l i starten af 1990'erne til nu, hvor koncentration i de sidste ti år har svinget mellem 6 og 20 µg/l. Forbedringen kan dog ikke tilskrives restaureringsprojektet; forbedringen skete hovedsagelig inden iltningens projektet startede, og der har ikke været nogen signifikant udvikling gennem de 15 år, hvor der har været iltet. Indtil 2008 og 2009 så det ud som om at den positive udvikling fra før indgrebet var fortsat, men siden er udviklingen vendt, og set over hele perioden er der ingen eller kun en ringe positiv udvikling. År-til-år-variationerne er store, og selv efter 15 år er udviklingen præget af vekslende "gode" og "dårlige" år.

Klorofylindholdet var hovedindikator for søer i vandplan 2009-2015. Indikatoren er i vandområdeplanerne 2015-2021 erstattet af Dansk Sø Planteplanktonindeks hvor også klorofyl indgår, og klorofyl anvendes stadig alene, hvis der ikke er data til beregning af det fulde indeks. Det er værd at bemærke, at søen har opfyldt kravet om en gennemsnitlig sommerklorofylkoncentration på 12 µg/l i 6 af de sidste 15 år, men også at kravene har været tydeligt overskredet i 6 eller 7 år (det gælder formentlig også for 2016 efter sigtdybden at dømme) af de øvrige år.

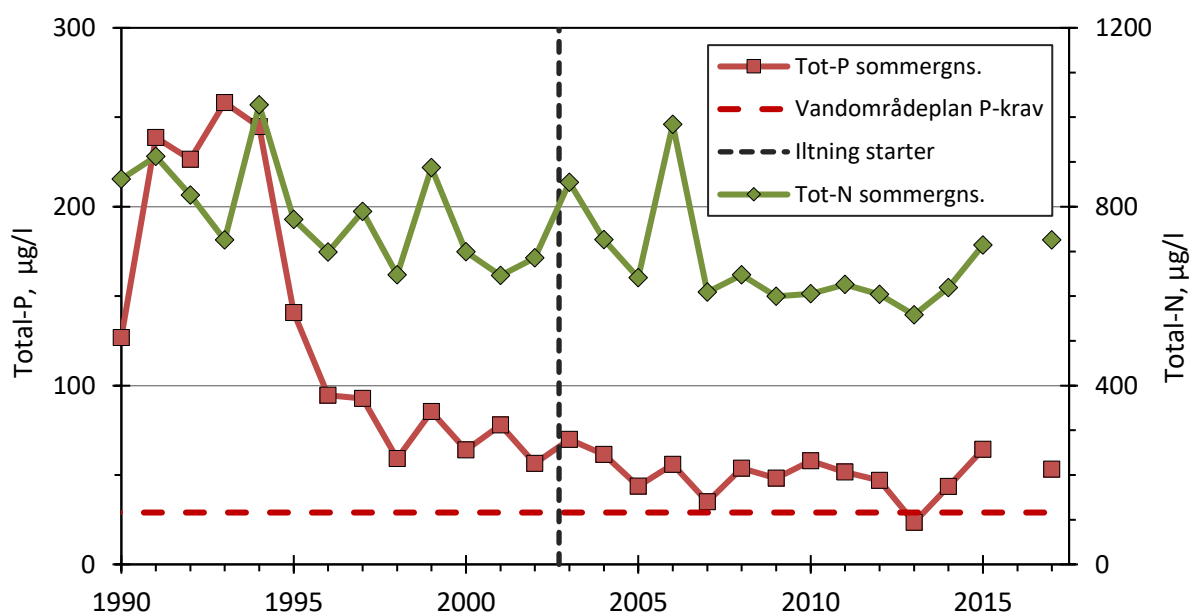
Sigtdybden er tydeligvis tæt korreleret til klorofylindholdet, og trenden er derfor den samme (Figur 3-1). Det oprindelige mål angivet i Regionplan 2005 og restaureringens mål med en sommer-sigt-dybde over 4 m har været opfyldt i 5 af de sidste 10 år. Ligesom for klorofyl så det ud som om, at den positive trend fra før indgrebet fortsatte, men efter en rekordstor sommersigt-dybde på mere end 5 m i 2008 er sigt-dybden igen faldet, og en langsigtet udviklingstendens er ikke tydelig og svær at forudse. Det er for tidligt at afgøre, om det er en ny negativ trend, eller det blot skyldes at søen stadig er ustabil og under forandring og derfor følsom for tilfældige ændringer i klimatiske forhold, belastning eller svingninger i fiskebestanden.

4. FOSFOR OG KVÆLSTOFDYNAMIK

Selvom restaureringsindgrebet i Furesø er rettet mod fosfor og ikke kvælstof, gennemgås udviklingen i begge næringsstoffer i det følgende.

4.1 Overfladevand

Udviklingen i sommergennemsnittet i total-fosfor og -kvælstof i overfladevandet er vist i Figur 4-1. Siden de meget høje total-fosforkoncentrationer i 1970'erne var reduceret ved afskæring af spildevandstilførslen, blev der i en fireårig periode i starten af 1990'erne, af ikke klarlagte årsager, igen målt høje koncentrationer (over 200 µg tot-P/l) i Furesø. Siden er koncentrationen faldet, først stejlt og siden jævnt, og faldet fortsatte også i de første år efter iltningen. Den så ud til at stabilisere sig på et niveau omkring 50 µg/l, svarende til det dobbelte af den da gældende vandplans "støtteparameter-værdi" på 25 µg/l. Men, i sommeren 2013 faldt total-fosforkoncentrationen for første gang til lige under 25 µg/l. Klorofyl og sigt-dybde reagerede positivt, og klorofylkoncentrationen faldt også til under vandplanens kravværdi (Figur 3-1). Det var dog foreløbig en enlig svale. I 2015 var total-fosforkoncentrationen den højeste siden 2003, og i 2017 var niveauet igen omkring 50 µg/l. Det er ikke muligt at se en klar udviklingstendens.



Figur 4-1 Udviklingen i den sommergennemsnitlige koncentration i overfladevandet af fosfor (total-P) og kvælstof (total-N) siden 1990. Vandområdeplanens fosforkrav er vist til sammenligning.

For total-kvælstof er der sket et mindre fald siden 1990 fra 800-1000 µg/l til nu omkring 600 - 700 µg/l. Kvælstofniveauet er relativt stabilt, da en stor del af kvælstoffet er bundet i opløste organiske forbindelser med meget lang omsætningstid. Kvælstofniveauet er dog både påvirket af den eksterne belastning og af år-til-år-variationer i forekomsten af kvælstoffikserende blågrønner (f.eks. i 1994, 2003 og 2006). Den langsigtede udvikling kan derfor både skyldes en ændret forekomst af blågrønner, og at der blev indført kvælstofrensning på Stavnsolt rensningsanlæg i 1993. Faldet efter 2003 kan være forstærket af en øget denitrifikation som følge af det forøgede iltindhold i bundvandet. Den positive udvikling er dog ikke fortsat; kvælstofniveauet har fulgt samme udvikling som fosfor, og efter et mindre fald i 2013 er niveauet nu lige så højt som for 15 år siden.

OBS: I foråret 2017 blevet klart, at analyselaboratoriet (ALS) har anvendt en forkert analysemetode for total-kvælstof og total-fosfor for ferskvandsprøver. ALS skriver på deres hjemmeside at resultater for total-kvælstof estimeres til at være 3 - 10 % for lave, mens total-fosfor kan være underestimeret med op til 30 %. ALS opgiver ikke, hvilken periode det drejer sig om. DCE, Århus Universitet, har gået analyseproceduren igennem for om muligt at udarbejde en korrektionsformel /31/. DCE skriver at det drejer sig om 2016 og første kvartal 2017. De har målt fejl (underestimering på omkring 16% for total-N og 15 % for total-P, men variationerne er så store og usystematiske, at de ikke anbefaler at man forsøger at korrigere enkeltanalyser. Der har også været fejl i total-N og total-P analyser fra laboratoriet EuroFins; fejlniveauet er ikke kendt.

I nærværende rapport drejer det sig om Figur 4-1, Figur 9-1 og Figur 10-1 der kan være direkte fejlbehæftede, men også nogle af de bagvedliggende beregninger og overvejelser kan være fejlbehæftede. Der er ikke mange analyser fra perioden 2016 til 1. kvartal 17, men rigtig mange i perioden 2010 - 2014. Det betyder at koncentrationerne af total-N og total-P formodentlig er højere end angivet.

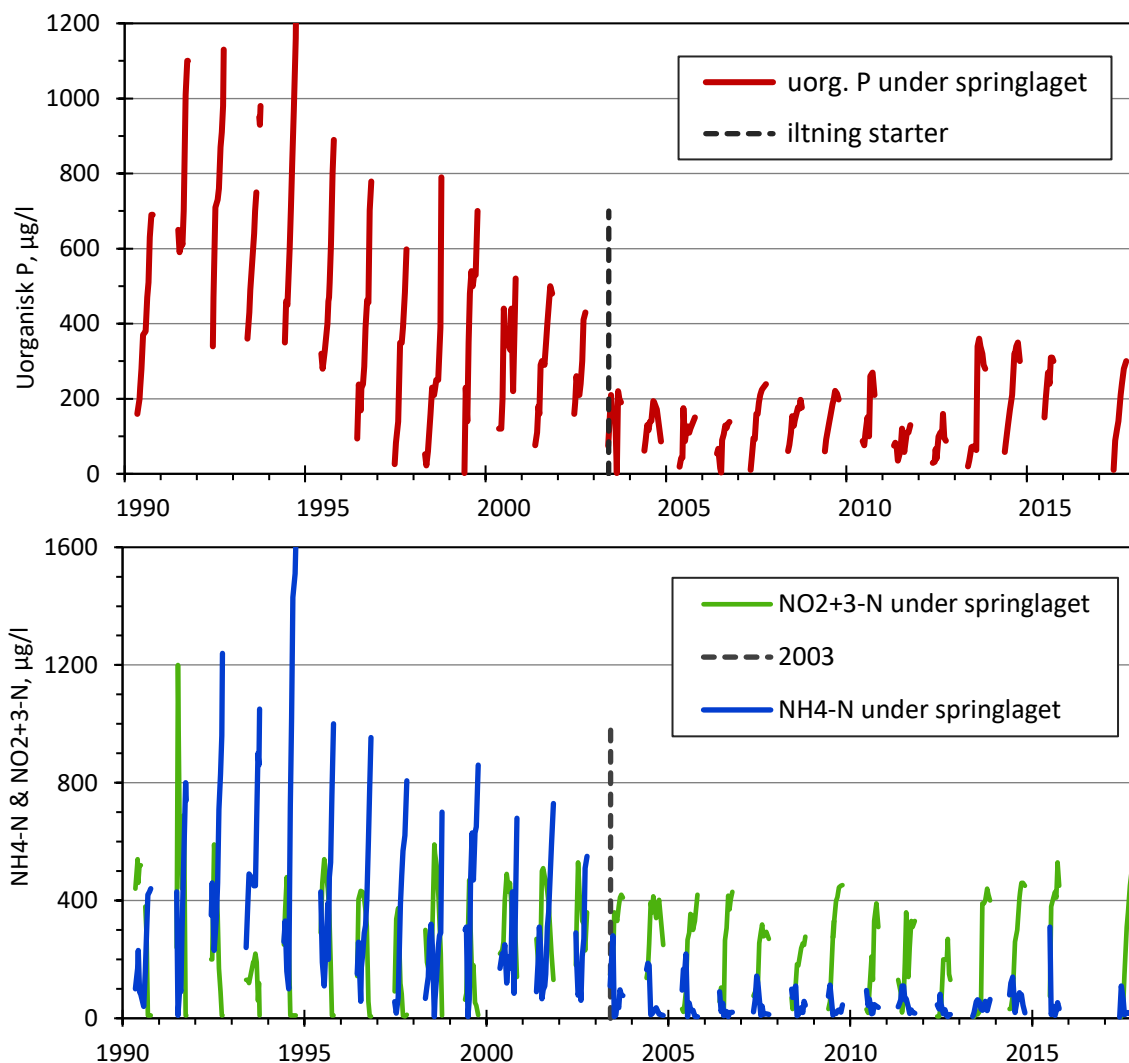
4.2 Fosfor og kvælstof i bundvandet

Det der normalt bidrager til at fastholde et højt fosfor- og klorofylniveau i en sø under aflastning, er den interne belastning, dvs. frigivelse af tidligere aflejret fosfor fra sedimentet. Det er en proces, der som tidligere nævnt forstærkes af iltfrie forhold, som netop skabes af en høj algeproduktion, dvs. en selvopretholdende "ond cirkel", som man kan forsøge at bryde ved f.eks. manipulation af fiskebestanden, eller ved iltning af bundvandet. Den "onde cirkel" kan også af sig selv ændres til en "god cirkel", hvis den eksterne belastning er lav nok, det tager blot meget længere tid. Den "gode cirkel" er selvforstærkende og fastholdes ved, at fosfor bindes i sedimentet, og f.eks. ved at der udvikles et udbredt plantedække, der binder yderligere næringssalte.

Figur 4-2, øverste panel, viser udviklingen i koncentrationen af uorganisk fosfat i bundvandet siden 1990; dvs. den viser kun data i den periode fra maj til oktober, hvor der er springlag. Figuren viser en række meget stejle kurvestykker, der illustrerer, at koncentrationen af uorganisk fosfat stiger stærkt i løbet af sommeren som følge af frigivelse fra sedimentet. Niveauet var dog allerede faldet betragteligt siden midten af 1990'erne, og dette fald fortsatte og blev som forventet forstærket, da iltningen startede i 2003. Det lave niveau har dog ikke været stabilt, og siden 2013 er den maksimale koncentration af uorganisk fosfat i bundvandet steget og har varieret mellem 300 og 360 µg/l. Det niveau er ikke meget lavere end de 430 µg/l uorganisk fosfat, der blev målt i 2002 inden iltningen blev påbegyndt. Denne stigning er endda større end den ser ud. I 2007 blev analysestrategien ændret fra separate analyser af hver af de 4-5 prøver, der tages under springlaget, til kun at omfatte en blandingsprøve. Figur 4-2 viser udviklingen i den dybeste prøve (hvor koncentrationen af fosfat forventelig er

højst) indtil 2007, og herefter er det værdien for blandingsprøven, der er afbildet. Ved en stabil forbedring af søens forureningstilstand ville man forvente, at kurven havde udvist et mindre fald efter 2007. Det skete ikke; tværtimod.

Det særlig interessante ved denne kurve (Figur 4-2) er, at der skete et ganske drastisk fald i den interne belastning i årrækken inden 2003, og fremskriver man den udvikling nogle få år, ser det ud til, at søen kunne have nået samme niveau i intern belastning, som den har nu, også uden ekstra ilttilførsel.



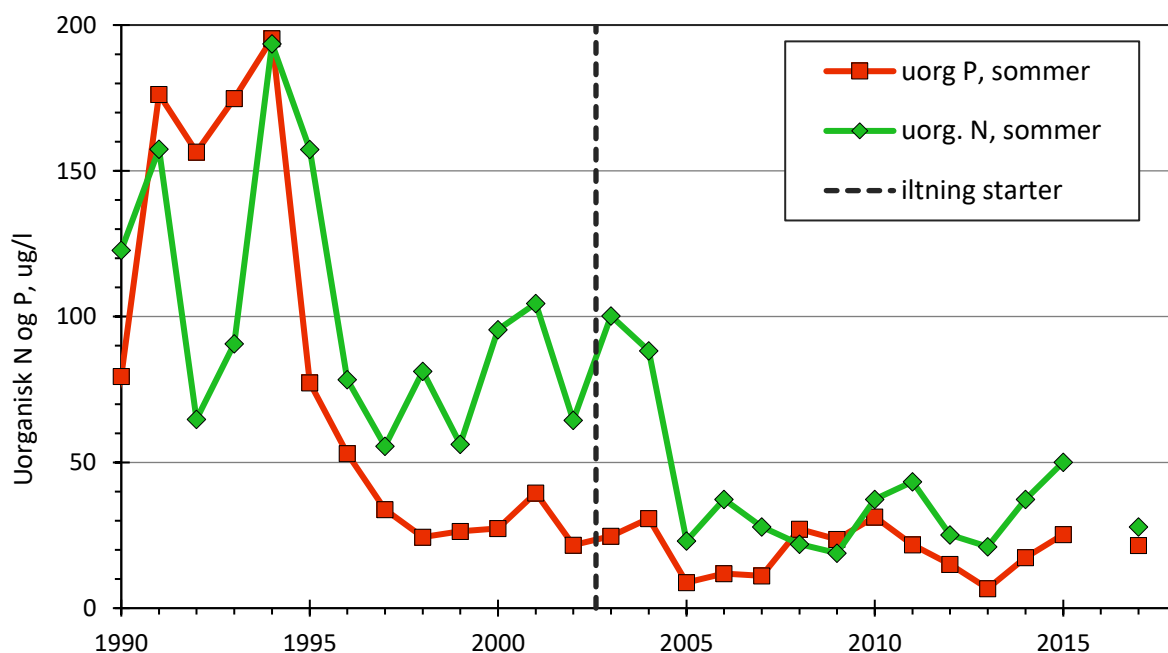
Figur 4-2 Øverste panel viser koncentrationen af uorganisk fosfat om sommeren i bundvandet under springlaget siden 1990. Når springlaget dannes i forsommeren, begynder opbygning af en pulje af opløst uorganisk fosfat i bundvandet ved omsætning af nedsynkende organisk stof og især ved frigivelse fra sedimentet. Nederste panel viser koncentrationen af ammonium- og nitrit og nitrat-kvælstof under springlaget. Når der ikke er ilt til stede, ophobes der ammonium, men under iltede forhold iltes det videre til nitrit og nitrat. Prøvetagningsmetoden blev ændret i 2007, se teksten for forklaringer.

Figur 4-2, nederste panel, viser udviklingen i koncentrationen af uorganisk kvælstof, det vil sige ammonium og nitrit + nitrat under springlaget, i de samme perioder som for uorganisk fosfor. Kurven viser flere ting. De høje niveauer af fosfor i 1990'erne er fulgt af relativt høje niveauer af uorganisk kvælstof. Dvs. fosforen stammer ikke kun fra tidligere jernbundet fosfor, der lækker ud af et

anoxisk sediment; en væsentlig del må stamme fra nedbrydning af organisk stof. Det ses også, at i årene inden iltningen forekom kvælstof hovedsagelig som ammonium: nitrit og nitrat koncentrationen faldt i løbet af sommeren, mens ammonium ophobedes. Begge forhold er tegn på et lavt iltniveau. Nitraten bruges som oxidationsmiddel i forskellige processer, og en del af det denitrificeres givetvis til elementært kvælstof under processen. Efter iltningen af bundvandet er ammoniumniveauet lavt og faldende gennem sommeren, mens nitrat akkumuleres. Begge forhold er tegn på gode iltforhold ved bunden som resultat af iltningen.

4.3 Uorganiske næringssalte i overfladevandet

Mens planktonalgerne selv udgør en del af indholdet af total-fosfor og total-kvælstof, er det tilgængeligheden af uorganiske næringssalte (uorganisk fosfat) samt summen af kvælstofforbindelserne nitrit, nitrat og ammonium) i overfladevandet, der styrer deres vækst. Ved høje niveauer af total-fosfor vil en stor del ofte findes på uorganisk form, og der er derfor i høj grad sammenfald mellem kurverne for total-P (Figur 4-1) og uorganisk fosfat (Figur 4-3). Kun en mindre del af total-kvælstof er derimod på uorganisk form, men udgør til gengæld en væsentlig mere dynamisk parameter. Uorganisk kvælstof reagerer tilsyneladende på iltningen med mere end en halvering af niveauet, og koncentrationerne af uorganisk fosfat og kvælstof er herefter af samme størrelsesorden. Faldet kan skyldes en øget denitrifikation i bundvandet, da de forbedrede iltforhold sikrer omdannelsen af ammonium til nitrat, som er en forudsætning for, at denitrifikationen kan forløbe.



Figur 4-3 Udviklingen i sommergennemsnittet i overfladevandet af uorganisk kvælstof (NO_{2+3} og NH_4) og af uorganisk fosfat (PO_4) før og efter iltningen af bundvandet startede i 2003. Bemærk at N og P her er afbildet på samme akse.

4.4 Begrænsende næringssalte

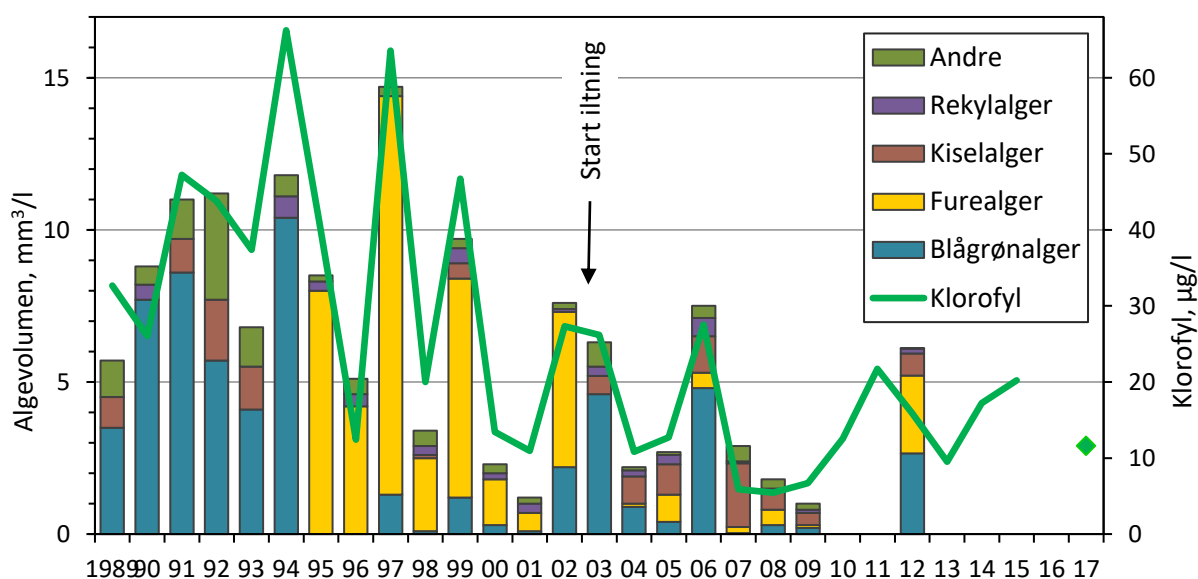
Søers algevækst betragtes almindeligvis som naturligt begrænset af tilgængeligt fosfor. Dette forhold forstærkes af, at de fleste søer ligger i landbrugsoplande, med stor tilførsel af kvælstof. Imidlertid udgør landbrug mindre end en tredjedel af Furesøs opland, hvoraf en del er ekstensivt drevet. Furesø har desuden været massivt belastet af husspildevand, der har et højt fosforindhold i forhold til kvælstof. Dermed er muligheden for kvælstofbegrænsning til stede.

Alger bruger kvælstof og fosfor i et vægtforhold på ca. 7:1. Under dette forhold må kvælstof regnes begrænsende, og også i intervallet op til 14:1 kan kvælstof være begrænsende. Forholdet mellem årgennemsnit af total-kvælstof og total-fosfor i Furesø har i de sidste 15 år varieret mellem 8 og 12, mens forholdet mellem de uorganiske salte i vækstperioden varierer mellem 1 og 4. Da uorganisk kvælstof samtidig forekommer i meget lave sommerkoncentrationer (10 – 30 µg/l), betyder det, at algevæksten i Furesø formentlig i perioder er kvælstofbegrænset.

5. ALGER OG UNDERVANDSVEGETATION

5.1 Planteplankton

Figur 5-1 viser sammensætningen af algebiomassen i sommerperioden i årene 1989-2012. Sammensætningen er udtrykt som volumen af de forskellige algegrupper i mm³/l, og samtidig er klorofylniveauet vist. Algevolumen og klorofylkoncentration følges som forventet ganske tæt, og algevolumen har ligesom klorofylkoncentrationen generelt udvist et fald over perioden, men med store år-til-årsudsving. Sammen med ændringen i biomassen er der sket et skifte i planktonsammensætningen; først fra dominans af de næringskrævende blågrønalger til dominans af furealger og siden, efter iltningen, et skifte mod et blandingsfund af furealger og kiselalger og med vekslende indslag af blågrønalger.



Figur 5-1 Planteplanktonets volumenbiomasse og sammensætning i sommerperioden (1. maj til 30. september) 1989-2012. Data for 2017 var ikke tilgængelige ved udarbejdelsen af rapporten. Klorofylkoncentration er vist til sammenligning.

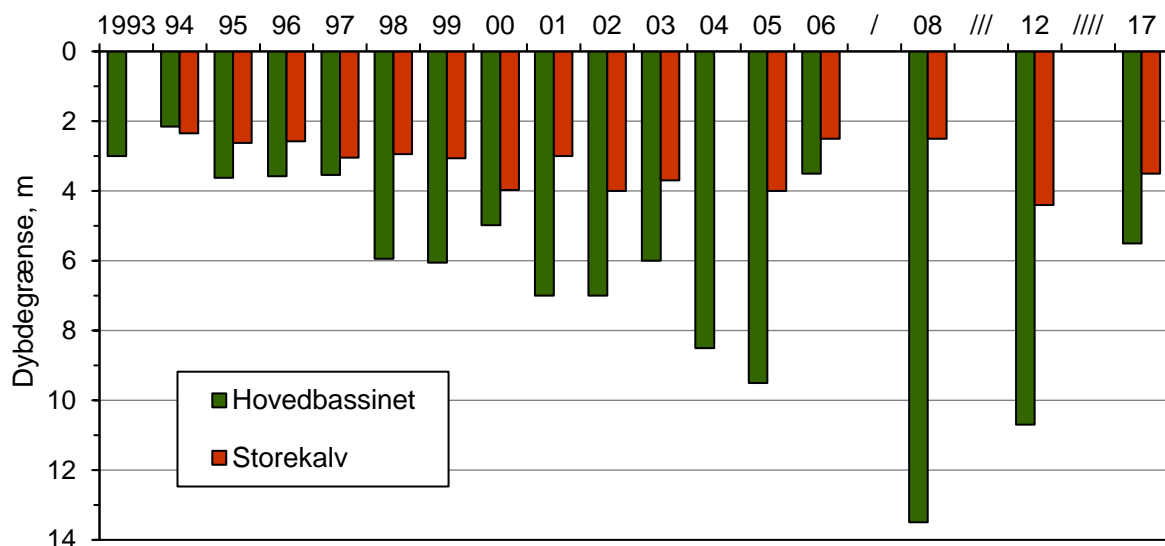
Skiftet i planktonsammensætningen må betragtes som positivt. Furealger er som gruppe mindre tolerant overfor næringsaltbelastning end blågrønalger, og de seneste års blandingsfund med lave biomasser er et udtryk for, at planktonalgesamfundet i Furesø er under udvikling og formentlig kommer til at indeholde flere rentvandsarter. Der er dog stadig år med blågrønalg-opblomstring. Det drejer sig især om 2003 og 2006, men også 2012 jf. Figur 5-1. Men, som det fremgår af figuren, måles der ikke så hyppigt som tidligere, og det kan derfor tilføjes, at der i 2014, 2015 og 2016 var blågrønalg-opblomstringer, der gav anledning til at badning blev frarådet.

5.2 Undervandsvegetation

Furesø 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. 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.

Vegetationens dybdeudbredelse afhænger især af lysforholdene ved bunden, og lysnedtrængningen afhænger af sigtdybden og dermed af klorofylkoncentration. Men udover at være en indikator for vandets klarhed, har bundvegetationen også en stabiliserende virkning ved selv at binde næringsstoffer i biomassen, og dermed gøre dem utilgængelige for planktonalgerne. Vegetationen fungerer desuden som substrat for filtrerende organismer, især den invasive vandremusling, der medvirker til at holde planktonniveauet nede. Den gavnlige effekt af bundvegetationen i Furesø betragtes traditionelt som temmelig begrænset pga. hovedbassinets stejle sider og dermed lille areal med velegnede dybder for vegetation. Store Kalv udgør dog omkring 20 % af søarealet og med en dybde under ca. 4 meter, må der her forventes et tæt samspil mellem vandfase og vegetation. Vegetationens stabiliserende effekt på næringsforholdene er dog ikke helt entydig, idet den foruden at binde næringsalte fra vandfasen også optager næringsalte fra sedimentet, og disse næringsalte frigives når planterne nedbrydes. Normalt sker dette dog om efteråret og ikke i vækstsæsonen.

Vegetationsundersøgelserne i Furesø viser, at vegetationen, efter at have været trængt tilbage til 2-3 m's dybde, siden midten af 1990-erne langsomt har bredt sig i takt med, at lysforholdene (som sigtdybden er et mål for) er blevet forbedret. Tilstanden har dog været ustabil, og bl.a. har den max. 4 m dybe Store Kalv været længe om at blive genbevokset, selvom lysforholdene var tilstrækkelige. Forklaringen er sikkert, at sedimentet har været for ustabil og iltfattigt for rodfæstede planter, og at lysforholdene generelt er dårligere i Store Kalv end i hovedbassinet.



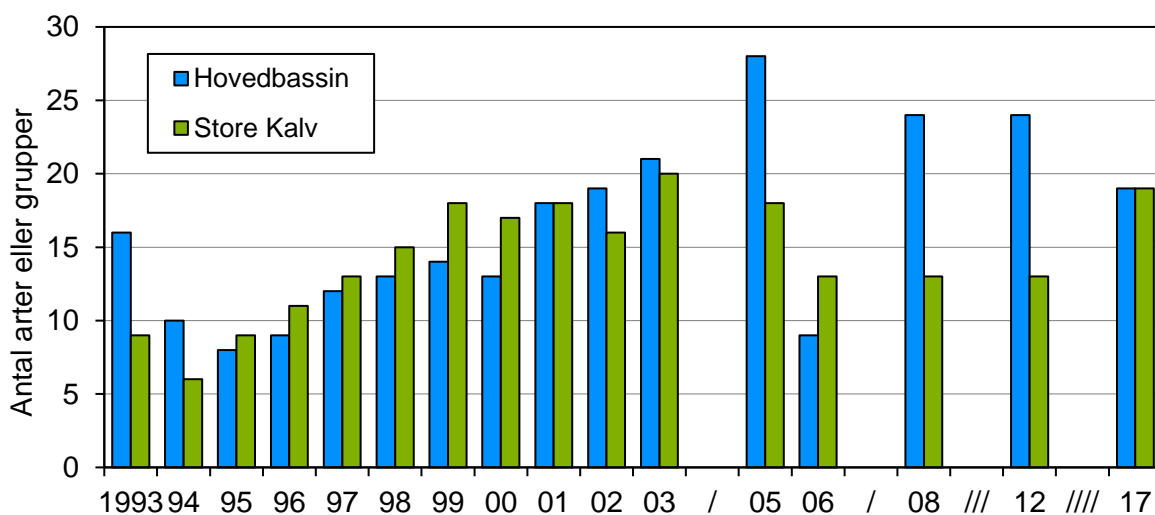
Figur 5-2 Dybdeudbredelse af rodfæstede planter og kransålgler i Furesøs hovedbassin og i Store Kalv i årene 1993-2017. Der er ikke undersøgelser i begge områder i alle år.

På Figur 5-2 ses udviklingen i undervandsvegetationens dybdeudbredelse. Vegetationen har udvist en særdeles positiv udvikling i dybdeudbredelse siden første halvdel af 1990'erne. I 2006 blev den positive udvikling dog midlertidigt brudt af en udsædvanlig varm sommer og en tidlig og stor opblomstring af blågrønaler. Sigtdybden var på intet tidspunkt over 2 m i sommermånederne juni, juli og august 2006, og i en lang periode var den endda under 1 m. Lyset blev dermed allerede på et tidligt tidspunkt slukket for undervandsvegetationen. Dybdeudbredelsen af rodfæstede planter blev mere end halveret, og der voksede ikke rodfæstede planter på dybder større end 3,5 m.

Tilbageslaget var dog ikke langvarigt. I 2008 blev der registreret en dybdegrænse på hele 13,5 m for rodfæstet vegetation. Selv i betragtning af den meget store sigtdybde i 2008 er dybdeudbredelsen usædvanlig stor. En så stor dybdeudbredelse er ikke registreret tidligere, heller ikke i forrige århundrede. Det skal dog retfærdigvis tilføjes, at undersøgelserne siden 2003 er foretaget med dykker, mens de gamle undersøgelser blev foretaget med kasterive. Dykkere burde være bedre i stand til at finde enkelte planter ned til store dybder. Metodeskiftet i 2003 førte dog ikke umiddelbart til et spring i målingerne, og den store dybdeudbredelse i 2008 kan derfor ikke blot tilskrives dette skifte.

Siden 2008 er sigtdybden forringet, og selvom vegetationsdybdegrænsen stadig var overraskende høj i 2012 (10,7 m), er den i 2017 reduceret til det halve (5,5 m) og dermed tilbage på niveauet fra slutningen af 1990'erne. Dybdegrænsen opfylder ikke restaureringsens mål på værdier over 6 m.

Store Kalv har trods sin ringe dybde, som nævnt, ikke altid haft fuldt vegetationsdække, men i 2010 blev store dele af Store Kalv dækket af den invasive vandplante smalbladet vandpest i en grad, så vegetationen stort set forhindrede al sejlads med rutebåd og lystbåde i området /32/. Fænomenet har ikke gentaget sig siden, og forekomsten af smalbladet vandpest er faldet, og den optræder ikke i vegetationsanalyserne i 2017. Ved undersøgelsen i 2012 blev der stadig registreret planter på de dybeste dele af Store Kalv, men dækningsgraden var betydelig mindre end i 2010. I 2017 blev der ikke fundet planter i de dybeste dele af Storekalv.



Figur 5-3 Antallet af registrerede arter/grupper af undervandsvegetation i Furesøs hovedbassin og i Store Kalv i årene 1993-2017.

Sammen med dybdegrænse og arealudbredelse har også artsantallet af undervandsplanter været stigende siden 90'erne. I 2005, 2008 og 2012 blev der registreret hhv. 28, 24 og 25 forskellige arter og grupper i hovedbassinet (Figur 5-3). Det registrerede artsantal reagerede ligesom dybdeudbredelsen

med et stærkt fald i tilknytning til blågrønalg-opblomstringen i 2006 og der blev kun registreret 9 arter inklusive trådalger. De fleste af de forsvundne arter blev genfundet i 2008. Samtidig med at dybdeudbredelsen er blevet reduceret i 2017 skete et fald i artsantallet.

På baggrund af den langsigtede udvikling kan det konkluderes, at vegetationen i Furesø har gennemgået en meget positiv udvikling op gennem 90'erne og 00'erne parallelt med de forbedrede lysforhold. I 2017 er dybdeudbredelsen tilbage på niveauet fra før iltningen startede. Der er dog langt mellem målingerne i de senere år, og detaljerne i udviklingen kendes ikke. Forholdene er dog ikke stabile, og det vil være helt afgørende for vegetationen, hvordan sigtddybden udvikler sig i de kommende år.

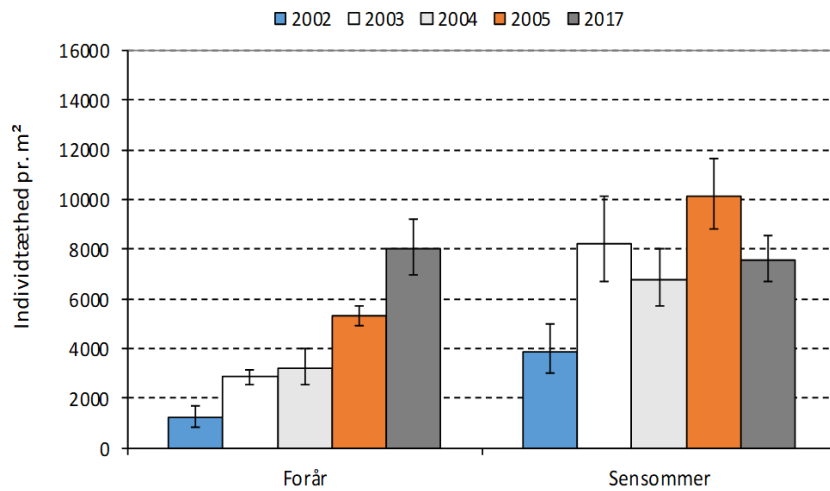
6. BUNDFAUNA

Et af formålene med ilttingsprojektet var at forbedre forholdene for bundfaunaen og de tilbageværende to arter af reliktkrebs. Iltningen af bundvandet forventes at have en stor indflydelse på faunaen på barbunden, profundalzonen, under springlaget. Bundfaunaen blev undersøgt i sommeren 2017, men har ellers ikke været undersøgt siden en række undersøgelser i forbindelse med opstarten af restaureringsprojektet – først en referenceundersøgelse i 2002 og siden undersøgelser i 2003, 2004 og 2005 for at vurdere den indledende effekt af iltning og biomanipulation. Bundfaunaen blev undersøgt både i april og august 2017 på 8 stationer på dybder mellem 18 og 36 m; de samme stationer som ved tidligere undersøgelser /27/.

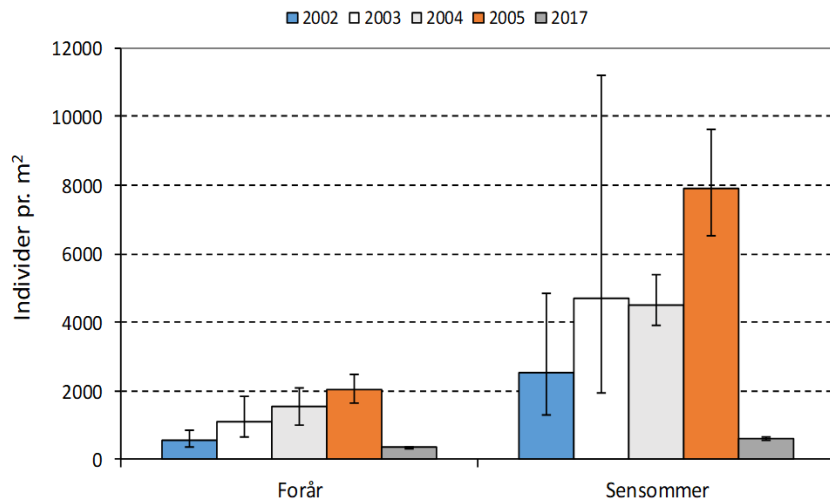
Kun få arter kan leve og vokse på en bund, der er iltfri 3-4 måneder om året, og Furesøens barbundsfauna har derfor i mange år været artsfattig og med lav tæthed.

Dansemyggen *Chironimus anthracinus* er en af de få arter, der er særlig tilpasset og kan overleve de lange perioder uden ilt. Den lever i mudderrør på bunden og æder det organiske materiale, der synker ned og aflejres på bunden. Fordelen ved at leve i dette miljø er den rigelige fødetilgængelighed, og fraværet af prædation fra fisk i den del af året, hvor bundvandet er iltfattigt. Tubificider, børsteorme, er en af de få andre dyregrupper der kan klare de iltfattige forhold.

Bundfaunaen har responderet markant og positivt på de forbedrede iltforhold. Figur 6-1 viser, at tætheden af individer er steget som følge af de forbedrede iltforhold både om forår (inden springlagsdannelsen) og om sommeren, hvor der før 2003, var iltfrit i en periode. Der er fra 2005 til 2017 sket et skift i artssammensætningen således, at dansemyggene er gået stærkt tilbage, så bundfaunaen nu domineres af orme, mens andre grupper, bla. muslinger, har øget deres udbredelse. Dansemyggen har under de forbedrede iltforhold mistet sin klare konkurrencefordel, og skiftet kan muligvis henføres til den forøgede og ændrede fiskebestand, og profundalzonen øgede tilgængelighed for fiskene som følge af de forbedrede iltforhold.

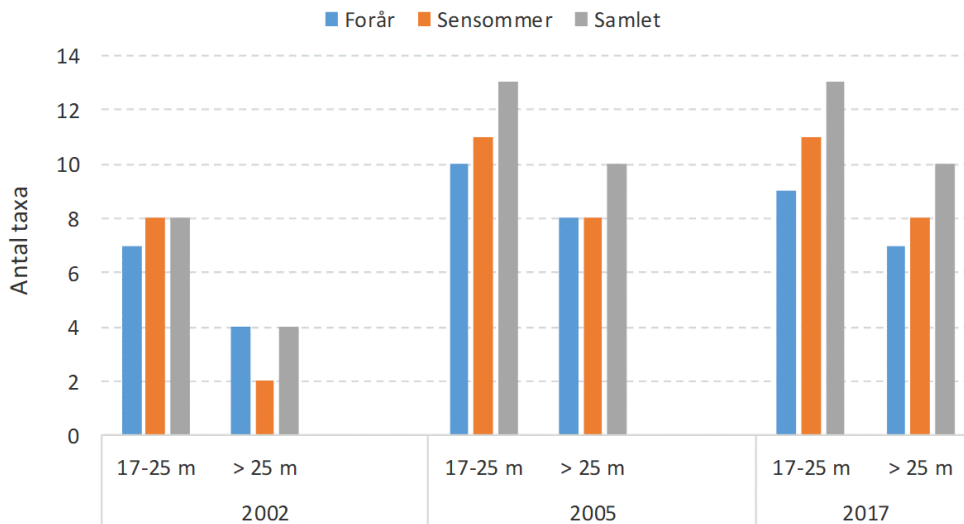


Figur 6-1 Middeltætheden af individer på barbunden i Furesø forår og sommer i årene 2002-2005 og 2017. Fra /27/.



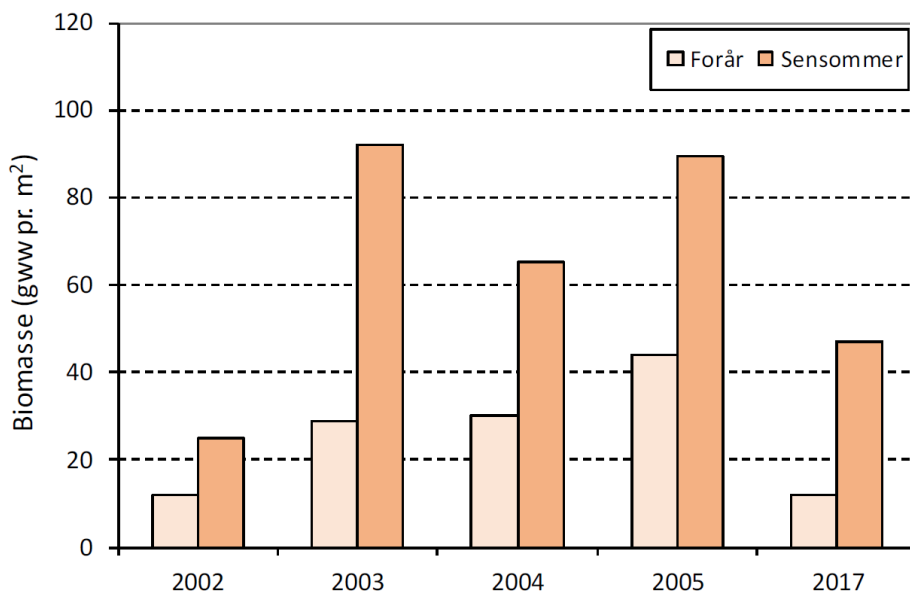
Figur 6-2 Tætheden af dansemyggen *C. anthracinus* på barbunden i Furesø forår og sommer i årene 2002-2005 og 2017. Fra /27/.

Artsrigdommen af bunddyr er som forventet steget siden 2002. Figur 6-3 viser, at artsrigdommen er størst på de lave dybder i sensommeren, og at der ikke er sket væsentlige ændringer siden 2005.



Figur 6-3 Antal taxa (arter eller grupper) identificeret forår og sommer i to dybdezoners af bunden. Fra /27/.

Reliktkrebsen *Pallasea quadrispinosa* blev fundet i 2017, men ikke *Mysis relicta*. Prøvetagningsmetoden var dog ikke velegnet til at påvise *M. relicta*, og der kan derfor ikke drages konklusioner om dens forekomst.



Figur 6-4 Bundfaunaens skønnede biomasse i profundalzone forår og efterår. Fra /27/.

Som et resultat af dansemyggenes tilbagegang er den samlede biomasse om foråret nu på samme niveau som før iltningen og en faktor 2,5 – 3,6 lavere end i de andre målear under iltningen. I sensommeren er biomassen ca. halvt så stor som under de tidlige målinger under iltningen, men trods alt ca. dobbelt så stor som før iltningen.

Sammenfattende vurderes det, at iltningen af bundvandet i Furesøen har haft en stor effekt på profundalfaunaen. I sensommeren er faunaen gået fra at have et ringe udviklet dyreliv bestående af et

fåtal hårdføre arter i 2002 til at opnå et mere alsidigt samfund af bunddyr, heriblandt flere iltfølsomme grupper i 2017. Indvandringen er sket gradvist. I 2005 var artsantallet øget til omkring det dobbelte i hele profundalزونen. Samme artantal fandtes i 2017 efter yderligere 12 års iltning /27/. Der er ingen tvivl om, at de forbedrede iltforhold har medført en forøget omsætning af det nedsynkende organiske materiale på bunden via en forøget aktivitet af både mikroorganismer og bundfauna. Dermed sker der også en forøget frigivelse af de næringssalte, der er bundet i det organiske stof.

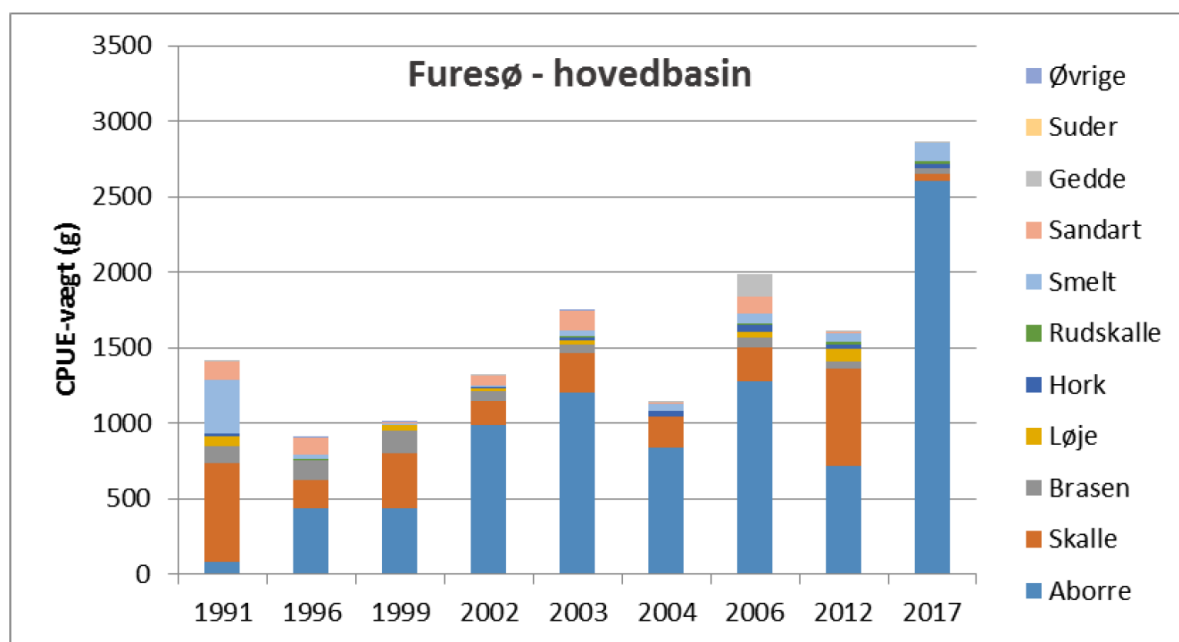
Det vurderes, at størstedelen af de opnåede forbedringer for bundfaunaen på kort sigt vil gå tabt, hvis iltningen ophører. På lidt længere sigt må man forvente forbedringer i form af kortere perioder med lavt iltindhold, men selv i en fuldt restaureret sø, vil man sandsynligvis ikke opnå de samme høje iltniveauer ved bunden og den samme artsrigdom af bunddyr som ved kunstig iltning.

7. FISK

Restaureringen af Furesø har også omfattet en manipulation af fiskebestanden. Næringsbelastning giver en forøgelse af fiskemængden og en forskydning i artssammensætningen, der gennem fødekæderelationer medfører en reduktion af dyreplanktons græsning på planteplankton og dermed forstærker eutrofieringseffekten. Fisk har en lang levetid, og en uhensigtsmæssig sammensætning af fiskebestanden kan medvirke til at fastholde en dårlig vandkvalitet i lang tid efter, at næringssaltbelastningen er bragt ned. Ved aktivt at manipulere fiskebestanden kan man derfor fremskynde udviklingen mod en renere (klarere) sø. Hvis næringsbelastningen er tilstrækkelig lav, vil den nye tilstand kunne blive stabil, men hvis ikke, vil fiskebestanden falde tilbage igen i løbet af en årrække, og den forbedrende effekt på klorofyl og sigt dybde vil aftage.

Fiskemanipulationen i Furesø foregik i årene 2003 – 2006 og gik i grove træk ud på at opfiske skaller og brasen, for derved at forbedre opvækstvilkårene for rovfisk, især aborre. Skaller og brasen spiser dyreplankton, og brasen roder desuden i bunden efter fødeemner på en måde, der kan forøge fosforfrigivelsen. Store aborrer er rovfisk og skulle, i tilstrækkeligt antal, være i stand til at kontrollere bestanden af skaller, brasen og andre dyreplanktonspisende fredfisk. Der blev i alt opfisket mere end 200 tons fredfisk.

Fiskebestanden er siden blevet undersøgt i september 2012 og igen i august 2017. Programmet i 2012 var dog noget reduceret i forhold til de øvrige undersøgelser; det inkluderede ikke Store Kalv, og der blev ikke elektrofisket i bredzonen.



Figur 7-1 Mængde og fordeling af fiskearter fanget i biologiske oversigtsgarn i Furesøs hovedbassin. Figuren viser den gennemsnitlige fangst (vægt) per garn. Antal og placering har varieret over årene, og tallene er derfor kun indicative. Rækkefølgen af fisk og farver i søjlerne er den samme som i signaturforklaringen ude til højre. Fra /21/.

Fiskebestanden har udviklet sig på flere fronter siden starten af 1990'erne (Figur 7-1). Biomassen (eller mere præcis fangsten per garn per tid - CPUE) har været stigende, og fangsten per garn var i 2017 den største hidtil i hovedbassinet. Der er samtidig sket en udvikling i artssammensætningen fra dominans af skaller og brasen til en altovervejende dominans af aborre. Dvs. at aborren er øget både i mængde og andel, og samtidig viser undersøgelsen fra 2017, at aborrebestanden har en god størrelsesfordeling og kondition. Desuden er fiskenes levestrømme øget, idet de nu kan leve i de dybere dele af søen, der før var utilgængelige om sommeren, og udnytte de føderessourcer der findes her.

I Store Kalv 2017 fanges der færre fisk end tidligere. Men også her dominerer aborre, efterfulgt af skalle. Fiskene er væsentlig mindre end i hovedbassinet, og årsyngel og ungfisk dominerer. Store Kalv fungerer tilsyneladende som yngle- og opvækstområde for flere af søens fiskearter /20/.

Fiskebestanden har altså udviklet sig særdeles gunstigt ud fra et vandkvalitetsperspektiv, og kan altså udelukkes som årsag til den manglende forbedring af tilstanden i Furesø.

For en mere detaljeret beskrivelse af resultaterne af 2017-undersøgelsen samt af den langsigtede udvikling henvises til /21/.

8. SEDIMENT

Sedimentet i de dybere dele af Furesø er helt afgørende for omsætningen af næringssalte. Her bundfældes planktonrester fra de øvre produktive lag, og disse rester omsættes helt eller delvist af bundens organismer. Næringssaltene kan deponeres permanent, eller de kan frigives igen til vandet, så de igen kan indgå i planktonproduktionen i de øvre vandlag. I de dybere dele under springlaget, bliver næringssaltene først tilgængelige for de produktive lag efter, at springlaget nedbrydes om efteråret. I de lavvandede dele af søen bliver en del af sedimentets næringssalte optaget af de planter, der vokser der, og de frigjorte næringssalte fra sedimentet kommer direkte ud i vandet på alle årstider.

8.1 Næringsaltsomsætning og -tilbageholdelse i sedimentet

Kvælstof omsættes og frigives som ammonium til vandet efterhånden som det organiske stof nedbrydes. Hvis der er tilstrækkelig med ilt til stede, sørger bakterier for, at ammonium hurtigt iltes til først nitrit og siden nitrat. Under veliltede forhold forbliver kun en lille del af kvælstoffet bundet til tungt omsættelige organiske forbindelser i sedimentet eller vandet (fx humusstoffer). Den dannede nitrat kan bruges som oxidationsmiddel af visse bakterier, og en del af kvælstoffet reduceres herved til frit kvælstof og er dermed ikke mere tilgængeligt som næringssalt for planteproduktionen.

Omsætningen af fosfor er anderledes. En del fosfor afgives direkte til vandet ved nedbrydning af det organiske stof, men en stor del indgår i forskellige forbindelser og kan bindes mere eller mindre hårdt i sedimentet. Det drejer sig om tungtopløselige kalcium- og aluminiumsforbindelser, adsorption på ler- og andre partikler, mere eller mindre let omsættelige organiske forbindelser samt jernforbindelser, hvis opløselighed afhænger af iltforholdene.

Under veliltede forhold og med tilstrækkeligt jern til stede, bindes en del fosfor i tungtopløselige jernforbindelser, og blandt andet derfor er fosforindholdet ofte højest i de øverste centimeter af sedimentet, hvor iltniveauet er højest (Figur 8-1). Med tiden og dermed med dybden i sedimentet sker der en fortsat frigivelse af fosfor, mens nyt fosfor tilføres overfladelaget ved partikelsedimentation.

Når iltniveauet falder og jernet reduceres, forsvinder fosforbindingsevnen og en del af det bundne fosfor frigives. Iltningsprojektet i Furesø havde netop til formål at holde sedimentoverfladen veliltet og dermed forhindre frigivelse af sedimentets jernbundne fosforpulje.

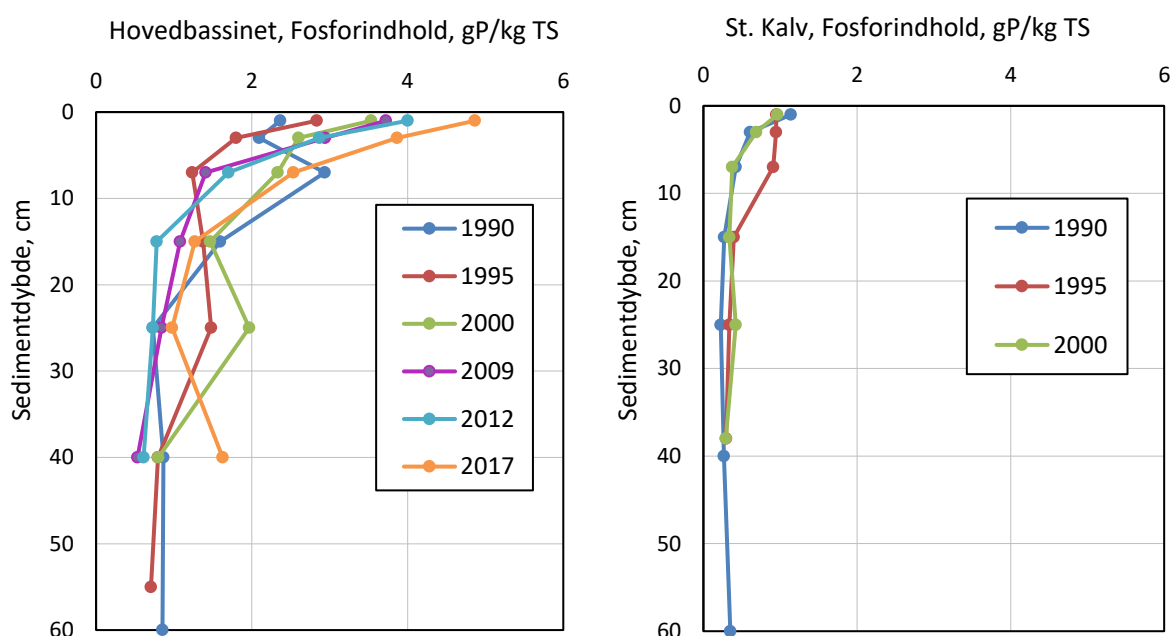
En sø tilføres hele tiden mineralske stoffer, kalcium, aluminium, jern samt ler-, silt- og sandpartikler, fra oplandet, som sammen med organisk stof aflejres i sedimentet. De dybere dele af en sø fyldes herved ganske langsomt op, og der deponeres og begravnes herved også en del af den sedimenterede og tungt opløselige fosfor og kvælstof. I 2009 blev denne aflejring af nyt sediment målt til 1,5 cm per år på Furesøens dybeste sted /13/. Søen tilbageholder dermed næringssalte, således at der afledes færre næringsstoffer fra søen end der tilledes. Denne tilbageholdelse afhænger af vandets opholdstid - jo længere opholdstid desto større del af næringssaltene tilbageholdes. For fosfors vedkommende er denne sammenhæng beskrevet i simple modeller, bla. Vollenweider-modellen og i den såkaldte modificerede OECD-model, og det er den type modeller, der ofte ligger til grund for fastsættelsen af den maksimale belastning der kan tåles, når en bestemt målkoncentration af total-fosfor i vandmassen kræves i en fremtidig ligevægtssituation.

Furesøen har en lang hydraulisk opholdstid på 10 -14 år afhængig af nedbøren. En opholdstid på 12 år giver ifølge Vollenweiders simple formel en tilbageholdelse på 78 % ved vandets passage gennem søer. Med en indløbskoncentration på 200 µg/l vil man få en koncentration i søen på 45 µg/l som årgennemsnit i en ligevægtssituation. Den modificerede OECD model giver under de samme forudsætninger en tilbageholdelse på kun 31 %, og vil kræve en indløbskoncentration på ca. 65 µg/l for at nå ned på 45 µg/l i søen. De to modeller vil i dette regneeksempel give en målbelastning på henholdsvis omkring 2000 kg og 700 kg fosfor om året. Det er OECD-modellen, der anvendes mest udbredt til beregning af fremtidige belastningsmål i vandplansammenhænge, mens Vollenweidermodellen kun anvendes i enkelte dybe søer, hvor den giver bedre overensstemmelse mellem forudsigelse og målinger /30/. Det må være OECD-modellen, der er anvendt i Vandområdeplan 2015-2021, hvor målbelastningen er sat til 794 kg per år, selvom det formodentlig vil være Vollenweidermodellen,

der bedst beskriver en fremtidig ligevægtssituation. Modellerne er dog som nævnt meget simple ligevægtssmodeller og vanskelige at anvende i en aflastningssituation, hvor der er stor intern belastning.

8.2 Sedimentanalyser

I forbindelse med overvågningen af Furesø er der udtaget prøver af sedimentet i Furesøs hovedbassin 6 gange siden 1990; tre gange inden iltningen og tre gange efter iltningen blev påbegyndt. Sedimentet er undersøgt i hovedbassinet på tre stationer beliggende på ca. 25 m's dybde, dvs. under springlaget og forholdsvis repræsentativt for den dybe lagdelte del af søen. I Store Kalv er der udtaget prøver 3 gange i årene inden iltningen begyndte. Sedimentkernerne er analyseret for bl.a. fosfor i flere dybder. Der er standardmæssigt kun analyseret for total-fosfor, men erfaringsmæssigt kan man regne med, at den mobile fosforpulje i Furesø udgør ca. halvdelen af total-fosfor i de øverste 10 cm /22/.

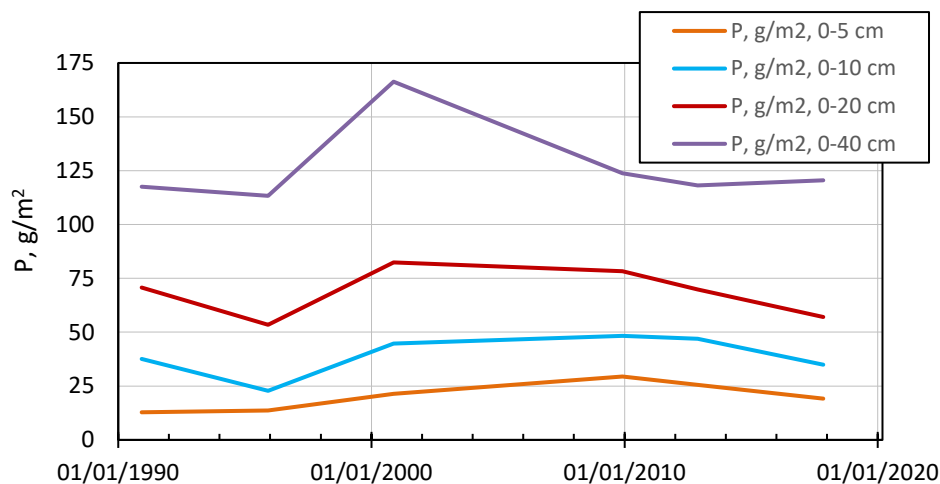


Figur 8-1 Dybdeprofil af sedimentets indhold af total-fosfor (gram total-P per kg tørstof), hhv. under springlaget (Hovedbassinet) og på lavt vand (Store Kalv) siden 1990. Gennemsnit af tre stationer, hvor der på hver station blev udtaget sedimentkerner.

Vurderer man resultaterne, er det mest overraskende nok, at der ikke er en tydelig udvikling gennem de 27 år, undersøgelse dækker, og heller ingen tydelig forskel fra før til efter iltningen blev sat i gang. Man kunne have forventet, at der var en større binding og dermed ophobning af fosfor i det nuværende veliltede overfladelag. Man kunne også forvente en hurtigere omsætning og dermed et noget lavere organisk indhold som følge af de forbedrede iltforhold. Ingen af disse forventninger er blevet opfyldt.

Der er til gengæld stor forskel mellem fosforniveauerne i den lavvandede Store Kalv og det dybe hovedbassin. Figur 8-1 viser dybdeprofiler af tørstoffets fosforindhold, og det er tydeligt at der begge steder sker en ophobning af fosfor i de øverste 10-15 cm. Det er også tydeligt, at det er i hovedbassinet under springlaget, at den største ophobning af fosfor sker.

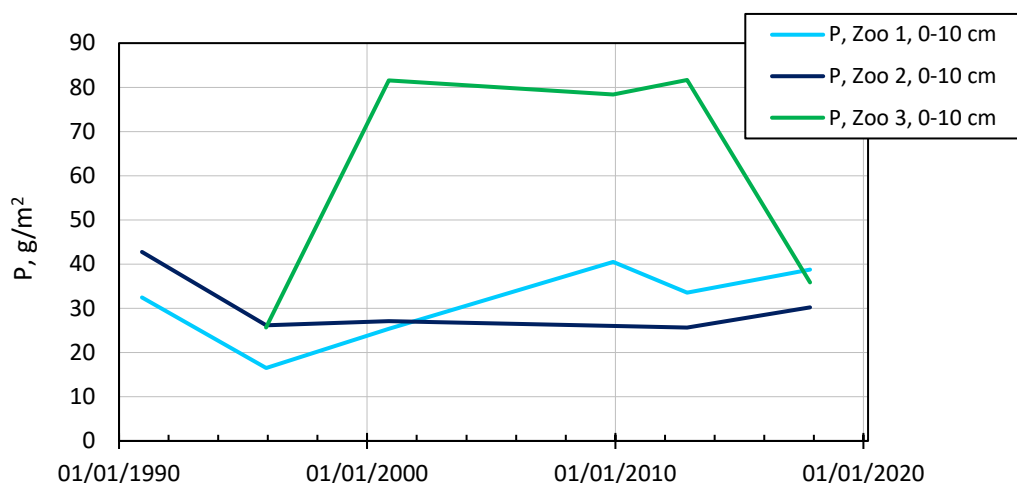
Betragter man fosforindholdet per kvadratmeter summeret over forskellige sedimentdybder (Figur 8-2), kunne man have forventet, at de større dybder var relativt stabile, mens de øverste 5 eller 10 cm havde vist en udvikling mod fx et større fosforindhold, som følge af de forbedrede iltforhold. (Når man forventer et lavere indhold i vandet, må man nødvendigvis forvente et større indhold i sedimentet). Når der ikke ses en udvikling, kan det skyldes at der ikke er sket en udvikling, men den store usikkerhed på målinger betyder også, at eventuelle ændringer er svære at påvise.



Figur 8-2 Fosforindholdet i sedimentet per kvadratmeter ned til hhv. 5, 10, 20 og 40 cm's dybde siden 1990 i hovedbassinet. Gennemsnit af tre stationer.

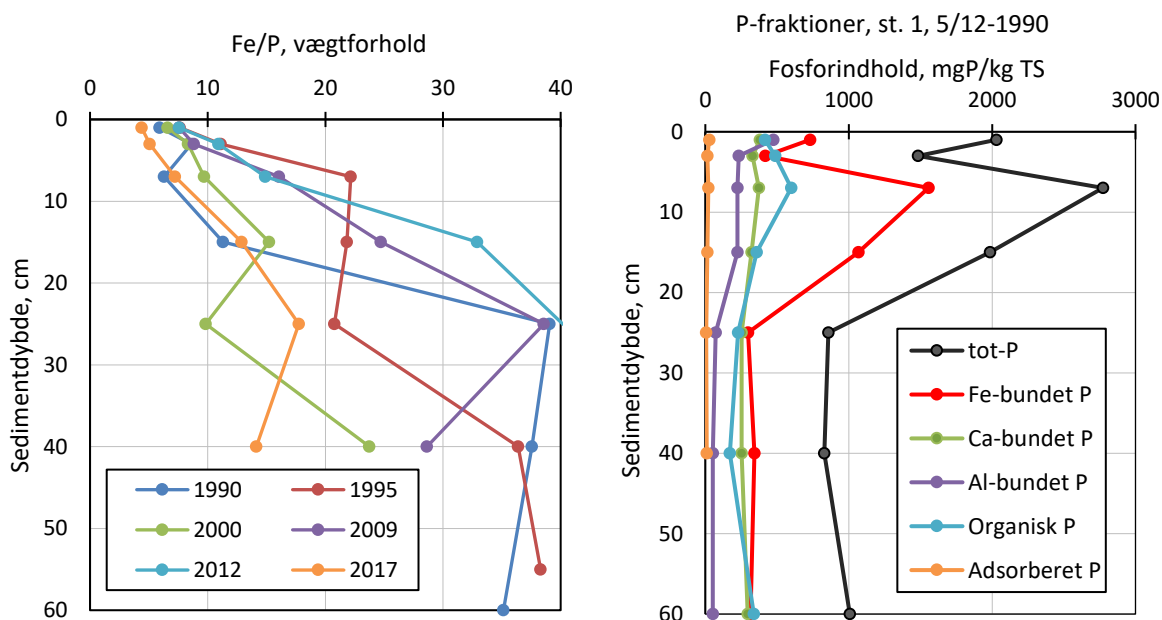
Mens Figur 8-2 viser gennemsnittet af tre stationer for en række dybdeintervaller, viser Figur 8-3 de enkelte stationer for dybdeintervallet 0-10 cm. Uden at lave statistik på resultaterne, er det umiddelbart tydeligt, at den individuelle variation er så stor, at der ikke kan konkluderes sikkert på en retning i udviklingen. På den anden side stemmer den tilsyneladende manglende udvikling i sedimentet ganske godt overens med den manglende langsigtede udvikling i vandfasen. Faldet i fosforindholdet i sedimenterne fra 1990 til 1995 svarer til ca. 15 g P/m², eller ca. 60 tons P i alt, og det stemmer faktisk godt overens med den stigning af fosforindholdet i vandsøjlen, der skete i perioden. Men, vi ved ikke, hvad der startede denne udtømmning af fosforpuljen i sedimentet, og vi ved heller ikke, hvad der fik den til at stoppe og til at stabilisere sig på et lavere niveau igen.

Den tidligere omtalte nettosedimentation, betyder at sedimentet "vokser" med op imod 1,5 cm om året i søens dybeste områder /13/. Det betyder, at det, der udgjorde sedimentoverfladen i 1990, nu ligger begravet under 40 cm nye aflejringer. I 1998 blev et par sedimentsøjler dateret og akkumuleringsraten beregnet, og i de dybeste områder af Furesø svarede det til, at der årligt begraves og dermed immobiliseres ca. 2,5 g P/m², men der på 25 m's dybde blev beregnet akkumuleringsrater svarende til 1,4 g P/m².



Figur 8-3 Fosforindholdet i sedimentet per kvadratmeter ned til 10 cm's dybde på 3 forskellige stationer. Det ses heraf, at gennemsnittene i Figur 8-2 dækker over store variationer mellem prøvetagningsstationerne.

For at der kan ske en effektiv jernbinding af fosfor under iltede forhold kræves – jern. Som tommelfingerregel skal der være et vægtforhold mellem jern og jernbunden fosfor på mindst 15, for at sikre en god binding. Der er ikke for nyligt målt hvor stor en del af fosforen, der er jernbundet, men både i 1990 og i 1998 var ca. halvdelen af det totale fosforindhold i overfladesedimentet jernbundet (Figur 8-4 og /13/). Jern/fosfor-forholdet i overfladesedimentet varierer fra 4,4 til 7,6 og det betyder, at fosforbindingen i sedimentoverfladen kan være jern-begrænset. Manglende bindingskapacitet kan være forklaringen på, at fosforbindingen tilsyneladende ikke øges, selvom bundvandet iltes.



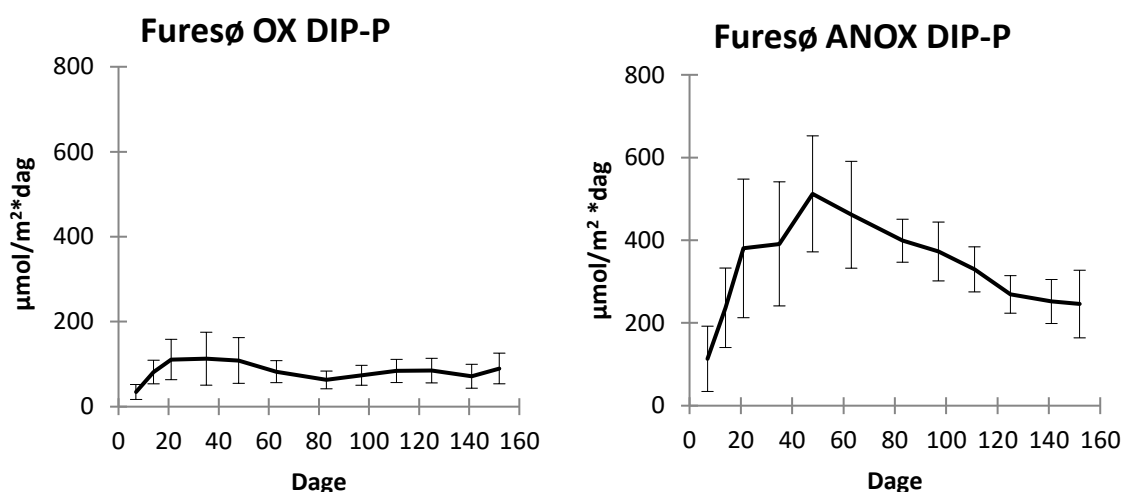
Figur 8-4 Venstre panel viser dybdeprofiler af vægtforholdet mellem jern og fosfor i sedimentet for seks prøvetagninger i perioden 1990 til 2017. Højre panel viser fordelingen af fem forskellige fosforfraktioner, der tilsammen udgør total-P ved en enkelt prøvetagning på en enkelt station i 1990. Alle prøver er fra hovedbassinet. Den mest mobile del af fosforpuljen består af det jernbundne, det adsorberede og størstedelen af det organiske fosfor, mens det calcium- og aluminiumbundne fosfor er bundet hårdere.

Søen har et areal på 940 ha, hvoraf ca. 400 ha ligger dybere end 15 m, dvs. under springlaget. Ca. 90 ha ligger mellem 10 og 15 m, som er den dybde springlaget typisk befinder sig, og de resterende 450 ha har vanddybder under 10 m og er dermed sædvanligvis ikke påvirket af springlaget.

Antager man, at halvdelen af de ca. 30 g P, der findes i sedimentets øverste 10 cm er mobilt (i de ca. 400 ha sediment der befinder sig under springlaget, og dermed er påvirket af iltningen eller ophør af samme), giver det en mobil pulje på ca. 60 tons. Hvis hele denne pulje mobiliseres og fordeles i hele vandfasen, svarer det til en forøgelse med ca. 0,5 mg P/l. Det svarer nogenlunde til hændelsen i starten af 1990'erne, hvor der blev målt over 1,2 mg P/l i bundvandet, og om efteråret op til 0,35 mg P/l i hele søen. Frigivelsen skete ikke på én gang, men de høje koncentrationer i vandsøjlen blev opbygget over 2-3 år. Det repræsenterer altså en worst-case for frigivelse af fosfor fra sedimentet i det tilfælde, at det besluttes at stoppe iltningen. Muligvis og med lidt god vilje er det også udtryk for det fald i sedimentkoncentration, der ses mellem 1990 og 1995 på figur 8.3.

Ovenstående målinger og overslagsberegninger er i overensstemmelse med et studie af sedimentet i Furesø på en enkelt station på 34 m's dybde i 1998 og 2009 /13/. Undersøgelsen i 2009 omfattede kun de øverste 3 cm, men konkluderer at puljen af mobilt P i dette lag ikke var ændret siden 1998, på trods af iltningen. Den mobile fosforpulje i 10 cm's dybde udgjorde i 1998 ca. 15 g/m², og det er i overensstemmelse med det, vi har vurderet ud fra de tilgængelige overvågningsdata. Den mobile del af fosforpuljen består af det jernbundne, det adsorbere og størstedelen af det organiske fosfor, mens det calcium- og aluminiumbundne fosfor som allerede nævnt er bundet hårdere, og bindingen er ikke iltfølsom.

Det bemærkes, at dybt i sedimentet, hvor der er permanent anaerobt, er omkring en tredjedel af fosforen bundet til jern. Dette forhold ses også i andre søer og antyder, at jern er vigtigt, også for den permanente deponering og immobilisering af fosfor

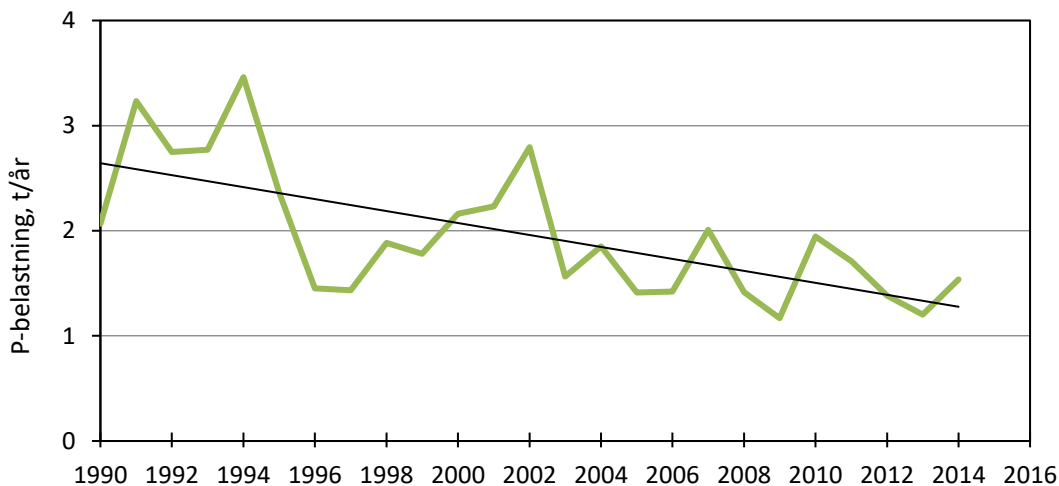


Figur 8-5 Frigivelse af fosfor fra sedimentet under hhv. iltede (tv.) og iltfrie (th.) forhold i et laboratorieforsøg i 2009. Grunden til, at frigivelsesraten fra det iltfrie sediment falder efter 50 dage, er muligvis, at det er et laboratorieeksperiment med en kun 3 cm tyk sedimentprøve, hvor der ikke løbende tilføres opløst fosfor fra dybere liggende lag og ikke sedimenterer frisk materiale på overfladen. Bemærk at enheden på y-aksen er µmol/m²/dag. 100 µmol fosfor svarer til 3,1 mg. Fra /13/.

Hele den mobile fosforpulje frigives ikke på én gang under iltfrie forhold. I 2009 blev der foretaget fosfor-frigivelsesforsøg på sediment under hhv. iltede og iltfrie forhold (Figur 8-5). Under iltfrie forhold steg frigivelsen af fosfor til bundvandet i løbet af 50 dage til ca. 15 mg/m² per dag, hvorefter frigivelsen faldt, sandsynligvis fordi der i forsøgsopstillingen kun blev brugt 3 cm tykke sedimentkerner, hvor der ikke løbende blev tilført nyt fosfor fra dybereliggende lag eller frisk sedimenteret materiale på overfladen. Hvis frigivelsen var stabiliseret ved 15 mg/m²/dag, vil det svare til en samlet fosfor frigivelse på knap 2 g/m² eller i alt ca. 8 tons gennem en 5 måneders sommerlagdeling. Forsøget viser også, at fosforfrigivelsen ikke stiger eksplosivt, når ilten forsvinder, men langsomt bygges op og fortsætter længe. Frigivelsen svarer til den nuværende interne fosforbelastning, der er i størrelsesordenen 10-12 tons om året, mens den potentielle fosforfrigivelse ved stop for iltning kan som et worst-case scenario blive på op til 60 tons i alt over nogle år, som det sås i midten af 90'erne. Dengang svarede fosforfrigivelsen, beregnet ud fra stigningerne i koncentrationerne i bundvandet i Figur 4-2, til 40-50 mg/m²/dag, eller samlet for søen til 15-20 tons per år.

9. NÆRINGSBELASTNING

Furesø har 3 betydende tilløb og 1 afløb. Mølleåen starter under navnet Hestetangså i afløbet fra Bastrup Sø, løber via Farum Sø og forsætter herfra via Fiskebæk (en 400 m lang kanal) til Furesø. Dumpedalsrenden er en lille bæk, der starter i Rudeskov og løber gennem Vaserne og ud i Store Kalv. Det tredje tilløb er Vejlesø Kanal, som forbinder Vejlesø med Furesø. Oplandet her er området omkring Søllerød Sø og Vejlesø, der er indbyrdes forbundet via Bækrenden. Furesø står i forbindelse med grundvandet, og bidraget herfra (grundvandsbidraget) kan være både positivt og negativt. Desuden tilføres Furesø rensset spildevand fra Stavnsøholt Renseanlæg.



Figur 9-1 Ekstern fosforbelastning til Furesø i tons per år.

Den eksterne fosforbelastning har været faldende fra 2-3 tons i starten af 1990'erne til det nuværende niveau på 1-2 tons (Figur 9-1), og er nu tæt på målopfyldelse. Ifølge Vollenweidermodellen giver en indløbskoncentration på 200 µg P/l, svarende til en belastning med 2 tons P, en årsmiddelkoncentration i søen på 45 µg P/l, svarende til en sommerkoncentration på ca. 30 µg P/l – i en fremtidig balanceret situation. Foreløbig overskygges den eksterne belastning dog af en årlig intern belastning i størrelsesordenen 10 - 12 tons. Men den lave eksterne belastning giver sammen med det lave jernniveau, en god forklaring på, hvorfor der ikke er ophobet en større pulje fosfor i sedimentoverfladen.; der er simpelthen ikke et overskud at indbygge ud over det, der begraves og immobiliseres i de dybere lag

og det der udledes gennem Mølleåen. Vi har ikke nyere data for fraførslen af fosfor, men i perioden 1989 – 2004 varierede fraførslen gennem Mølleåen fra 0,7 til 7,2 tons P.

10. HVAD SKER DER, HVIS DER SLUKKES FOR ILTEN?

Der findes i litteraturen mange forskellige modeller, der kan forudsige søers fremtidige udvikling ved forskellige indgreb. Jo mere komplekse og detaljerede de er, desto højere er kravet om individuel tilpasning og kalibrering. Ophør af iltning af bundvandet i Furesø er en så omfattende og ikke-naturlig ændring, at vi vil mene, at det er vanskeligt at opstille en kompleks model på forhånd, da erfaringerne med denne type indgreb er meget begrænset. En kompleks strukturdynamisk model fra 2006, der skulle forudsige effekterne af biomanipulation og iltning af bundvandet i Furesø /23/, er ikke efterfølgende blevet valideret, men forudsigelserne ligger temmelig langt fra virkeligheden og er ikke bedre end andre simplere vurderinger. Problemet er ikke, at det ikke er en god og velstruktureret model, men nærmere at Furesøen er en kompleks sø, og at indgrebet, der skal modelleres, er omfattende og ikke har været prøvet før; dvs. der findes ikke et erfaringsmateriale at kalibrere og validere modellen med.

Modellen /23/ forudsagde, at maksimumværdierne af total-fosfor gennem de første 10 års iltning ville blive reduceret med 50 %, fra 290 µg P/l til 140 µg P/l, af uorganisk fosfat med 60 % fra 240 µg P/l til 93 µg P/l, og af klorofyl med 37 % fra 35 µg chl.a/l til 22 µg chl.a/l. I virkeligheden skete disse fald i fosfor over en 5 årig periode fra 1995 til 1999 "af sig selv", mens der stort set ikke er skete noget i iltningssperioden efter 2003. De maksimale klorofylværdier overskrider til gengæld jævnligt den høje startværdi på 35 µg P/l. Så modelforudsigelser og den faktiske udvikling stemmer dårligt overens.

Furesø er altså svær at forudsige. En god grund til at være forsigtig og ikke for skråsikker er endvidere udviklingen i starten af 1990'erne, hvor den interne belastning med fosfor steg fra ca. 10 til 20 - 25 tons/år i gennem en periode på fire år, og i 1992 og 1993 var der mere end 50 tons fosfor i vand-søjlen tidligt på vinteren, når springlaget blev opløst - før den faldt til et mere normalt niveau igen i slutningen af 90'erne. Vi ved ikke, hvad der udløste hændelsen, eller hvad der fik den til at slutte. Belastningen fra Farum Sø var i samme periode forøget med ca. 1 ton P/år, og der blev arbejdet på Stavnsholt anlægget med indførelse af kvælstoffjernelse - men hvordan det eventuelt kan udløse en kaskadeeffekt i hele søen savner stadig en god forklaring.

Hvis der ikke iltes, vil de ca. 500 t ilt, der findes i bundvandet, når springlaget etableres, blive brugt op og bundvandet blive anoxisk i løbet af en til to måneder efter, at springlaget er etableret jf. Figur 2-1. Frigivelsen af fosfor har i de sidste år vist en svagt stigende tendens (Figur 4-2), og selvom det ikke kan påvises, at der er sket en ophobning af fosfor i overfladesedimentet, må det forventes at der ret hurtig vil ske en frigivelse af jernbunden fosfor i de første år i tilfælde af iltfrie forhold på måske op til 4-5 g/m² - som et worst-case scenario. Springlaget lægger et effektivt låg på bundvandet og de høje fosforkoncentrationer, så de først spredes til hele vandmassen, når vækstsæsonen er slut. En stor del af denne fosfor vil være tilgængelig, når vækstsæsonen begynder igen og vil - igen som en worst-case - kunne medføre 2-3 gange større klorofylniveauer end det nuværende niveau. Det er også set tidligere. Det kan forventes, at søen derefter over nogle år vil falde tilbage på niveauet fra før iltningen startede, som ikke var væsentlig dårligere mht. klorofyl, sigtdybde og vegetationsudbredelse end det nuværende niveau. Selvom vegetationen i en periode skulle få dårligere forhold

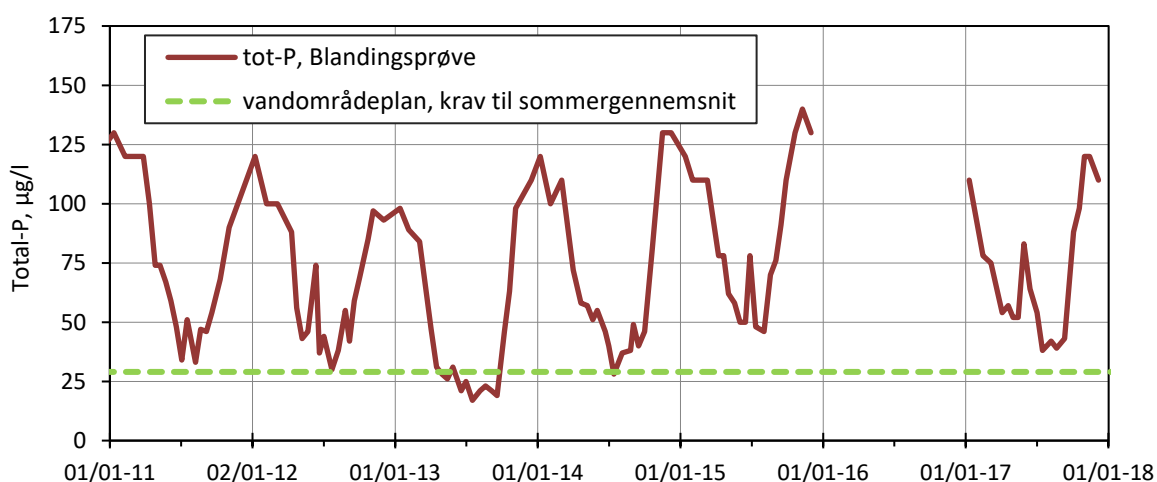
end i dag, viser udviklingen fra år til år, at den relativt hurtig kan brede sig igen, når forholdene bliver til det.

Den eksterne belastning med fosfor er reduceret fra ca. 2,5 til ca. 1,5 tons siden 1990 og er tæt på målopfyldelsen afhængig af hvilken beregningsmodel man anvender. Vi vil derfor også forvente, at Furesø efter en årrække vil lande på et vandkvalitetsniveau, der er bedre end der fandtes ved en højere ekstern fosfortilførsel, før iltningen blev indledt. Problemet er den forventede forøgede interne belastning ved ophør af iltning og Furesøens lange hydrauliske opholdstid. Men, hvis fosforniveauerne stiger væsentligt i en periode, er det muligt at skylle en del af overskuddet i søen ud, når koncentrationen er høj i vinterhalvåret. Når springlaget nedbrydes i løbet af oktober, og det fosforrige bundvand opblandes i hele søen, stiger fosforkoncentrationen med omkring 100 µg/l, som det fremgår af Figur 10-1. Ved den meget store interne belastning og de deraf følgende høje fosforkoncentrationer i vandsøjlen i vinterhalvåret ved hændelsen i 1990'erne, var fosforbalancen positiv, og der blev på et enkelt år skyllet 3,7 tons fosfor ud gennem afløbet til Mølleåen, hvilket er mere end det dobbelte af den eksterne belastning. En vurdering af effekten af afstrømningen fra Furesø på den nedstrøms liggende Lyngby Sø ligger uden for denne rapport's rammer.

Iltningen har været styret så fint, at den ikke har nedbrudt springlaget, men det vides ikke, om den omrøring i bundlaget, der følger af ilttilførslen, har betydning for fosforfrigivelsen og opblandingen i bundvandet og dermed tilførslen til de mere produktive lag når springlaget langsomt eroderes gennem sommeren.

Hvis der skal slukkes for ilten, er det lige nu et godt tidspunkt i forhold til fiskebestandens størrelse og sammensætning. Den stærke dominans af aborre vil formentlig bestå flere år ud i fremtiden, og der bliver således ikke umiddelbart en forstærket eutrofieringseffekt fra skalle og brasen og andre dyreplanktonspisende fisk. Men, det vides ikke, hvordan fiskebestanden vil reagere på længere sigt, når den mister hele vandmassen og bunden under springlaget at søge føde på i sommerhalvåret. Men fiskebestanden vil forventes at falde. Det nuværende udgangspunkt for at overveje at stoppe iltningen er dog som nævnt gunstigt med udgangspunkt i fiskebestandens øjeblikkelige sammensætning og aborredominans.

Når der ikke iltes, kan målet om >6 mg ilt/l under springlaget selvsagt ikke opfyldes.



Figur 10-1 Total-fosforkoncentrationen i vandmassen over springlaget i Furesø gennem en årrække.

Hvis der ikke slukkes for ilten, er der intet, der tyder på, at der er en væsentlig miljøforbedring i udsigt i Furesø, og at det f.eks. skulle være bedre at slukke om 10 år. Muligvis forhaler man blot udskyllingen af overskuddet af fosfor ved at vedblive at holde koncentrationen i bundvandet nede. Og man fastholder en sø med et unaturligt højt iltniveau på bunden og en særpræget iltprofil med ilt over og under, men ikke i, springlaget.

11. KONKLUSION OG ANBEFALINGER

Iltningsprojektet og fiskemanipulationen startede i 2003, og for de vandkemiske parametre findes nu så lange måleserier både før og efter indgrebene, at det er muligt forsigtigt at konkludere på resultaterne.

11.1 Furesøs tilstand og hidtidige udvikling

Flere af delmålene for Furesøs udvikling har gennemgået en positiv udvikling siden 2003. Enkelte af forbedringerne skyldes uden tvivl iltningen, mens andre bedst tolkes som en fortsættelse af den udvikling, der allerede foregik inden indgrebet.

1. Som en direkte effekt af den fortsatte iltning, er der nu mere end 4-6 mg ilt/l under springlaget i den kritiske sensommerperiode.
2. Iltningen af bundvandet i Furesøen har haft en meget positiv effekt på bundfaunaen i profundalfzonen, både mht. til artsantal og biomasse, men biomassen er i den seneste undersøgelse gået væsentlig ned. Muligvis skyldes det prædation fra fisk, der har unaturligt gode (ilt)forhold under springlaget.
3. De forbedrede iltforhold betyder, at et større bundareal og et større vandvolumen med et rigere fødeudbud er tilgængelig for fiskene. Aborren har konsolideret sig og udgør nu over 90 % af fiskebiomassen i hovedbassinet. Opfiskningen af skidtfisk i 2003-2006 kan have medvirket til denne udvikling, men den forbedrede vandkvalitet og måske de gode iltforhold ved bunden er nok hovedårsagen til, at denne tilstand er fastholdt gennem 15 år.
4. Det var forventet, at en af de væsentligste effekter af iltningen af bundvandet ville være en reduktion af fosforfrigivelsen fra sedimentet i de iltfrie sensommerperioder og dermed en reduktion af det generelle fosforniveau i Furesøen. Frigivelsen af fosfor fra sedimentet var i årene inden 2003 faldet støt, og det umiddelbare fald i frigivelsen, der skete efter 2003, var ikke større, end det der tilsyneladende ville være nået, hvis man fremskrev det hidtidige fald med 2-3 år. Frigivelsen har siden varieret en smule, men uden en tydelig retning. Det totale fosforniveau fortsatte også den hidtidige trend med et lille fald i årene efter 2003, men det er siden steget en smule og er nu tilbage på niveauet før iltningen startede. Det totale fosforniveau er mere end dobbelt så højt som det mål for årsgennemsnittet, der oprindeligt blev sat for restaureringen, og ca. dobbelt så højt som det mål for sommergennemsnittet (29 µg/l), vandområdeplanen 2015-2021 har opstillet.
5. Det generelle kvælstofniveau (total-kvælstof) har udvist mindre fald over tid, men med stigninger i år med blågrønalgopblomstringer. Faldet efter 2003 er ikke stort, og der har været tendens til en ganske lille stigning i de senere år, men niveauet er alligevel lavere, end det

har været i mere end 30 år. Dette kan blot være et udtryk for den langsigtede udvikling i søen efter nedsættelse af belastningen, men det kan også være hjulpet på vej af en øget denitrifikation som følge af iltningen. Sidstnævnte understøttes af, at der er sket et fald i niveauet af uorganisk kvælstof i overfladen siden iltningen startede.

6. Klorofylkoncentrationen (dvs. algemængden) varierer meget fra år til år, men trenden har været faldende siden starten af 1990'erne, og denne trend er fortsat efter 2003. Sommer-klorofylkoncentrationen nåede et foreløbigt minimum i 2007 – 2009, hvor det daværende krav om <math>< 12 \mu\text{g/l}</math> var opfyldt i tre år i træk, se side 8 og side 12. Siden har klorofylniveauet svinget, men for det meste været over dette niveau
7. Sigtdybden er tæt koblet til klorofylkoncentrationen og har over en 25-årig periode, været stigende, men udviklingen siden 2003 har ikke haft en tydelig retning.
8. Udbredelsen af bundvegetation er via lysnedtrængningen tæt koblet til sigtdybden og klorofyl, og bundvegetationens dybdegrænse har udviklet sig meget positivt fra et lavpunkt på 2-3 meter i starten af 1990'erne til over 13 meter i 2008. Siden er sigtdybden igen reduceret og vegetationens dybdegrænse er i 2017 tilbage på niveauet i slutningen af 90'erne og opfylder ikke målsætningen for sørestaureringen om en dybdeudbredelse til mindst 6 m. Artsrigdommen er ikke påvirket i samme grad og har ved tidligere tilbageslag (2006) vist sig hurtigt at kunne retableres. Det tyder på tilstedeværelse af et velegnet sediment, særligt i hovedbassinnet, og en god frø- og sporebank, og det viser, at vegetationen hurtigt kan medvirke til at konsolidere en positiv udvikling.
9. De 3-4 "gode år" fra 2007 til 2009 med lavt klorofylniveau, stor sigtdybde og (i det omfang det er målt), få blågrønalger, stor dybdeudbredelse af vegetation er ikke afspejlet i nærings-saltniveauerne. Vi har tidligere spekuleret, om der kunne have været en gunstig udvikling i fiskebestanden, men det forklarer ikke, at den nuværende tilstand ikke er bedre, i betragtning af at fiskebestanden nu må betragtes som meget domineret af aborre.

Udviklingen i Furesø efter restaureringsindgrebene stemmer godt overens med de generelle erfaringer fra tilsvarende projekter i Danmark og i udlandet. Ilttilførsel til bundvandet medfører forbedrede iltforhold, og en reduktion i ammoniak- og fosforkoncentration i bundvandet, mens der sjældent sker forbedringer i overfladevandet, med mindre der samtidig sker en reduktion af den eksterne belastning /6, /16, /17/. Opfiskning af fredfisk kan ofte give tydelige effekter på vandkvaliteten i de første 2-6 år, hvorefter de fleste søer "falder tilbage" til den tidligere tilstand. Fosforkoncentrationen og den eksterne belastning er afgørende for, om der opnås permanente effekter /17/. I Furesøs tilfælde ser det ud til, at der er sket væsentlige forbedringer i fiskebestanden, hvis biomasse er steget markant, og aborre dominerer i 2017 og kontrollerer formodentlig skalle og brasen bestandene, der er på endog meget lave niveauer. Selvom fiskebestande er dynamiske og varierer en del, er den samlede fiskebiomasse steget og brasenbestanden er på et meget lavt niveau i forhold til, da opfiskning og iltning blev igangsat.

11.2 Fremtidig udvikling og anbefaling

Som en direkte konsekvens af iltningen, er der nu gode iltforhold ved bunden og dermed gode forhold for bundfauna og fisk under springlaget. Med hensyn til den generelle vandkvalitet, lysforhold og forholdene for vegetationen er der ikke opnået stabile og vedvarende forbedringer, og der er ikke

tegn på, at det vil ske inden for en kortere årrække. Den eksterne belastning har været faldene og nu bragt til et niveau hvor søen, hvis den ikke var belastet af en stor intern fosforpulje, burde kunne opfylde de vedtagne mål jf. Tabel 1-1 og Figur 9-1.

Vi vil derfor lægge op til, at man stopper iltningen og lader søen udvikle sig naturligt. Det har ikke været muligt at se en ændring i sedimentkemien gennem de sidste 15 år, og det er muligt, at søen vil vende tilbage til den relativt gode udvikling den var inde i, inden iltningen begyndte. Men der er risiko for, at der indledningsvis vil frigives en større mængde fosfor end der sker nu. Til gengæld vil det også være muligt at få dette fosfor skyllet ud over en årrække, uden at gøre noget, eller ved at forøge afløbet fra søen om vinteren ved at sænke vandstanden en smule. Det kan tage tid at gennemføre denne udskylning med henvisning til søens lange opholdstid, men vi vurderer, at det vil være fornuftigt og forsvarligt, hvis alternativet er iltning i al fremtid. Tidsperspektivet er meget vanskeligt at forudsige. Men hvis man som worst-case accepterer en forværring svarende til den i begyndelsen af 1990'erne, der varede fem år, burde man derefter efter få år komme ned på et fosforniveau som før iltningen, og formodentlig endnu lavere, da den eksterne belastning siden er bragt yderligere ned og muligvis fordi, der ved dårligere iltforhold, ved ophør af kunstig iltning, vil bindes en del af fosforen i uomsat organisk materiale i søbunden.

En mulig "blød" overgang kunne være at trappe iltningen ned over et par år, således at bunddyrene i et vist omfang kan overleve på de større dybder og fiskene stadig i nogen grad kan udnytte bundens fødekilder. Herved får fiskebestanden mulighed for at indstille sig til et mere begrænset rum og fødeudbud. Man ville også få mulighed for at følge de vandkemiske parametre og gribe ind, hvis udviklingen skulle gå ganske anderledes end forventet. Den mulighed ville man dog også have, hvis man slukkede for ilten uden at fjerne iltanlægget, men samtidig fulgte udviklingen nøje gennem et monitoringsprogram.

11.3 Monitorering

Uanset om man vælger at skrue ned eller slukke helt for ilten, er det vigtigt at følge udviklingen tæt, så det vil være muligt at gribe ind, hvis udviklingen bliver markant dårligere end forventet. Der bør planlægges et monitoringsprogram, der kunne tage udgangspunkt i det eksisterende overvågningsprogram, men gentages årligt, og hvor fiske-, bundfauna, vegetation og planktonprogrammerne bliver udført hvert eller hvert andet år, indtil søen er inde i en stabil udvikling. Sedimentprogrammet kunne suppleres med en række mere realistiske forsøg for at få et bedre billede af udvekslingen mellem vand og sediment og dermed af tidsperspektivet i ændringerne.

12. REFERENCER

- /1/ Larsen, M.B., Fabricius, P. (red). 2006. Restaurering af Furesø – en næringsrig sø nær København. Sammendrag af oplæg ved konference 22. og 23. maj 2006.
- /2/ Skaarup, P. 2006. Restaureringsprojektet - Iltning. Indlæg ved konferencen Restaurering af Furesø – en næringsrig sø nær København, 22. og 23. maj 2006.
- /3/ Naturstyrelsen. 2011. Vandplan 2010-2015. Øresund. Hovedvandopland 2.3, Vanddistrikt Sjælland.
- /4/ Rudersdal Kommune. 2011. Status for vandkemi, sigtddybde og undervandsvegetation i Store Kalv, maj – juni 2011. Statusnotat, 5 pp.

- /5/ Höhener, P., Gächter, R. 1994. Nitrogen cycling across the sediment-water interface in an eutrophic, artificially oxygenated lake. *Aquatic Sciences* 56:2, 1015-1621.
- /6/ Gächter, R., Wehrli, B. 1998. Ten Years of Artificial Mixing and Oxygenation: No Effect on the Internal Phosphorus Loading of Two Eutrophic Lakes. *Environ. Sci. Technol.*, 32, 3659-3665
- /7/ Fishcon og Carl Bro 2001. Ilttilførsel til Furesøen. Detailprojekt. 64 pp + bilag
- /8/ Sand-Jensen, K. et al. 2008. 100 years history of vegetation decline and recovery in lake Fure, Denmark. *Journal of Ecology*. 96, 2:260-271.
- /9/ Furesø Kommune 2009. Furesø 2007 - 2008. Effekt af ilttilførsel. Rapport udarbejdet af Rambøll, 24 pp
- /10/ Furesø Kommune 2010. Furesø 2007 - 2009. Effekt af ilttilførsel. Rapport udarbejdet af Rambøll, 27 pp
- /11/ Furesø Kommune 2011. Furesøs miljøtilstand. Effekten af ilttilførsel 2007 - 2011. Rapport udarbejdet af Rambøll, 18 pp
- /12/ Furesø Kommune 2013. Furesøs miljøtilstand 2012. Rapport udarbejdet af Grønlands Naturinstitut, 30 pp
- /13/ Jensen, H.S. 2010. Notat om sedimentforholdene i Furesøen. Sammenligning af sedimentprøver fra 1998 og 2009. 1998-analyserne udført af H.S. Jensen og 2009-analyserne af M. Jensen, Syddansk Universitet. Undersøgelsen i 2009 er finansieret af CLEAR (Center for Sørestauring, SDU)
- /14/ Søndergård, M. 2007. Næringsstoffdynamik i søer med fokus på fosfor, sedimentet og restauring af søer. Doktordisputats.
- /15/ Jeppesen, E. et al. 2005. Lake responses to reduced nutrient loading - an analysis of contemporary long-term data from 35 case studies. *Freshwater Biology* 50: 1747-1771.
- /16/ Liboriussen, L. et al. 2009. Effect of hypolimnetic oxygenation on water quality: results from five Danish Lakes. *Hydrobiologia* 2009, 625: 157-172
- /17/ Liboriussen, L. et al. 2007. Sørestauring i Danmark. Del I: Tværgående analyser. Faglig rapport fra DMU nr. 636.
- /18/ Liboriussen, L. et al. 2007. Sørestauring i Danmark. Del II: Eksempelsamling. Faglig rapport fra DMU nr. 637.
- /19/ Breukelaar, A.W., Lammens, E.H.R.R., Klein Breteler, I.G. P., Tatrai, I. 1994. Effects of benthivorous bream (*Abramis brama*) and carp (*Cyprinus carpio*) on sediment resuspension and concentrations of nutrients and chlorophyll a. *Freshwater Biology*, 32: 113-121.
- /20/ Madsen, F.N. 2005. Fiskebestanden i Furesøen, 2005. Rapport til Frederiksborg Amt.
- /21/ Jensen, H.J. 2018. Fiskeundersøgelse i Furesøen 2017. Notat fra Fiskeøkologisk Laboratorium.
- /22/ Flindt, M.F. et al. 2015. Den interne fosforbelastning i danske søer og indsvingningstiden efter reduktion af fosfor. Notat, SDU
- /23/ Gurkan, Z., Zhang, J. Jørgensen, S.E. 2006. Development of a structurally dynamic model for forecasting the effects of restoration of Lake Fure, Denmark. *Ecological Modelling*, 197: 89-102.
- /24/ Miljø- og Fødevareministeriet 2016. Vandområdeplan 2015-2021 for Vandområdedistrikt Sjælland, juni 2016
- /25/ Miljøministeriet 2014. Anvendelsen af modelværktøjer til vurderinger af målbelastning for søer i vandområdeplaner 2015-2021. Methodenotat, 9 pp.
- /26/ Københavns Amt 2005. Søer - Status og udvikling, 1989-2004.

- /27/ Fiskeøkologisk Laboratorium 2017. Profundalfaunaen i Furesøen. Rapport, 28 pp
- /28/ Miljø- og Fødevareministeriet 2017. Bekendtgørelse nr 1522 af 15/12/2017 om miljømål for overfladevandområder og grundvandsforekomster
- /29/ Miljø- og Fødevareministeriet 2016. Natura 2000-plan 2016-2021, Øvre Mølleådal, Furesø og Frederiksdal Skov Natura 2000-område nr. 139 Habitatområde H123, Fuglebeskyttelsesområde F109.
- /30/ Miljøministeriet 2014. Retningslinjer for udarbejdelse af vandområdeplaner 2015-2021.
- /31/ Larsen et al 2018. Genopretning af fejlbehæftede kvælstof- og fosforanalyser. Ferskvand. DCE, Teknisk rapport nr 110.
- /32/ Fiskeøkologisk Laboratorium 2010. Notat vedr. undervandsvegetation i Store Kalv, september 2010. Notat til rudersdal Kommune, 3 pp.