

FREDERIKSBORG AMT OG KØBENHAVNS AMT

DETAILPROJEKT

for etablering og drift af et anlæg til

ILTILFØRSEL TIL FURESØEN



Furesø januar 2001 (foto: Jesper Ansbæk)

Udarbejdet af Fishcon Aps i samarbejde med Carl Bro as

Februar 2001

INDHOLDSFORTEGNELSE

		<u>Side</u>
0.	RESUMÉ	4
1.	INDLEDNING	7
2.	BAGGRUNDEN FOR ILTTILFØRSEL TIL FURESØEN	9
2.1	<i>Iltforbrug- omsætning af organisk stof</i>	9
2.1.1	<i>Aerobe processer</i>	9
2.1.2	<i>Anaerobe processer</i>	11
2.2	<i>Effekt af ilttilførsel</i>	14
2.2.1	<i>Kemi</i>	14
2.2.2	<i>Fysiske forhold</i>	17
2.2.3	<i>Biologiske forhold</i>	19
3.	FURESØENS ILTBEHOV	22
3.1	<i>Beregning af Furesøens iltbehov</i>	22
3.2	<i>Beregning af iltbehovet i de forskellige afsnit af Furesøens hypolimnion</i>	25
4.	KRAV TIL ILTNINGSANLÆGGET	27
5.	METODER TIL ILTTILFØRSEL	29
5.1	<i>Tilførsel af atmosfærisk luft</i>	30
5.1.1	<i>Beluftning på land</i>	31
5.1.1.1	<i>Indpumpnings-retursystem med beluftning på land</i>	31
5.1.2	<i>Beluftning i søen</i>	34
5.1.2.1	<i>Diffusorer med luftforsyning fra kompressor</i>	34
5.1.2.2	<i>"Deep shaft" og "Mammutpumpe" systemer</i>	38
5.2	<i>Tilførsel af ren ilt</i>	39
5.2.1	<i>Indpumpningssystem og opiltning på land</i>	41
5.2.2	<i>Iltning i søen</i>	44
5.3	<i>Vægtning af løsninger på ilttilførsel til hypolimnion i Furesøen</i>	45
6.	ILTNINGSSYSTEM VED FURESØEN	46
6.1	<i>Anlæg på land</i>	46
6.2	<i>Kryoanlæg</i>	46
6.3	<i>Forsyningsledninger</i>	49
6.4	<i>Diffusorer</i>	50
6.5	<i>Afmærkning</i>	51
6.6	<i>Udlægnings- og ophalingsudstyr</i>	51

	<u>Side</u>
7. KONTROL OG STYRING AF ILTTILFØRSLEN.....	53
8. TIDSHORISONT FOR RESTAURERING AF FURESØ.....	55
9. ØKONOMI.....	57
9.1 <i>Etablerings- og driftsomkostninger.....</i>	<i>57</i>
9.2 <i>Opdeling i entrepriser.....</i>	<i>59</i>
10. TIDSPLAN.....	60
11. INFORMATION.....	60
REFERENCER.....	64
BILAG.....	65

0. RESUMÉ

Tilførsel af ilt til Furesøens iltfattige bundvand vil have væsentlige positive effekter på miljøtilstanden. Med baggrund i 16 års ilttilførsel til Hald Sø ved Viborg kan det dokumenteres, at der vil være:

- en umiddelbar effekt,
- virkning på langt sigt.

I dette detailprojekt gennemføres en indgående analyse, der dokumenterer, at en metode med tilførsel af ilt fra en tank på land til perforerede gummislanger (diffusorer) placeret på Furesøens bund vil medføre, at Furesøens tilstand vil forbedres drastisk.

Den umiddelbare effekt vil være et fald i frigørelsen af fosfor fra bunden om sommeren. Ilttilførsel til bundvandet om sommeren medfører, at fosfor ikke kan frigøres fra jern i søbunden. Herved sker en formindskelse af denne ”interne fosforbelastning”. Det er den interne fosforbelastning (10-15 tons fosfor pr. år), som helt dominerer forureningssituationen, idet denne er 5-7 gange så stor som den ”eksterne belastning” (2 tons/år), d.v.s. den fosfor, der tabes fra omgivelserne til søen, f.eks. ved tilført spildevand.

Efter opstart af ilttilførsel til Furesøen kan man forvente, at den interne belastning vil falde til ca. 30 % af det nuværende niveau, måske allerede det første år. Ved en nøje styring af ilttilførselen kan det forventes, at den interne belastning vil være nede på ca. 10 % efter 10 år.

Efter nogle år vil de naturgivne muligheder for fosforfrigivelse fra bunden falde, idet algerne i overfladen producerer mindre og mindre organisk stof, fordi deres vækst bliver begrænset af fosformangel. Der kan således efter en 10-årig periode forventes, at algevæksten kun vil have 20 % af den nuværende mængde fosfor til rådighed til produktion af nye alger. Dette betyder, at tilførslen af døde alger, der skal nedbrydes og forbruge ilt i bundvandet om sommeren, vil falde med omkring 80 %.

Det drastiske fald i fosforkoncentrationen i Furesøen som følge af ilttilførsel vil betyde, at sigtdybden vil stige væsentligt. Surhedsgraden vil falde som følge af en mindre algeproduktion; pH-værdier over 9 vil forekomme med mindre hyppighed. Bunddyrene vil få mulighed for at leve på det meste af Furesøens bund og skabe en stor biologisk produktion til gavn for søens økologiske system, fisk og fugle.

De hurtige forbedringer i miljøtilstanden betyder, at iltbehovet, d.v.s. den mængde ilt, der skal tilføres pr. år til Furesøen falder hurtigt. Dette medfører, at driftsudgifterne falder væsentligt gennem restaureringsperioden.

Der findes en omfattende viden om Furesøens miljøforhold, og årsagerne til den utilfredsstillende tilstand. Denne viden siger utvetydigt, at det der skal til for at forbedre miljøtilstanden, er en reduktion af den interne belastning. Den sammenlignende analyse mellem Hald Sø og Furesøen viser, at der ved ilttilførsel vil opnås tilsvarende eller endog mere drastiske forbedringer af Furesøens miljøforhold, end tilfældet har været ved Hald Sø.

Forudsigelsen af disse virkninger tager udgangspunkt i følgende forhold:

- tilførsel af kvælstof fra omgivelserne pr. arealenhed ved Furesøen er 10 gange mindre pr. år end ved Hald Sø
- tilførsel af fosfor fra omgivelserne pr. arealenhed ved Furesøen er mere end 3 gange mindre pr. år end ved Hald Sø
- jernindholdet i Furesøen til rådighed til at binde fosfor er væsentligt større end i Hald Sø
- iltningssystemet, der er projekteret for Furesøen, vil være meget mere effektivt end det, der har været anvendt ved Hald Sø, idet de mange erfaringer fra Hald Sø projektet er anvendt ved udarbejdelse af det tekniske forslag for tilførsel af ilt til Furesøen.

Der er foretaget en vurdering af fordele og ulemper ved forskellige metoder til ilttilførsel til Furesøen.

Det er vurderet, at iltning med ren ilt ved hjælp af diffusorer på de dybeste steder i Furesøen vil være den mest hensigtsmæssige metode.

Iltning med ren ilt kan også gennemføres ved at pumpe bundvand ind på land og tilføre ilten der. De meget store vandmængder, som det er nødvendigt at opilte på land for at tilføre den ønskede iltmængde, medfører dog, at denne metode teknisk og økonomisk er mindre attraktiv end tilførsel af ilt direkte til bundvandet v.h.a. diffusorer placeret på søens bund.

I stedet for ren ilt kan der anvendes atmosfærisk luft til at ilte vandet (beluftning). Iltning med atmosfærisk luft kan gennemføres ved at pumpe bundvand ind på land og tilføre ilten der. Det forudsætter dog, at der pumpes endnu større vandmængder (ca. 3 gange mere) end ved iltning på land med ren ilt, således at denne

metode kræver omfattende tekniske anlæg og er forholdsvis meget dyrere end iltning i søen med ren ilt.

Iltning med atmosfærisk luft kan også gennemføres ved iltning i søen med diffusorer. Denne løsning vurderes dog at være dyrere at gennemføre end iltning i søen med ren ilt. Endvidere medfører den en overmætning af vandet med kvælstof, der indebærer en væsentlig risiko for skader på fiskebestanden.

En anden metode til beluftning ("Deep shaft" og "Mammutpumpe" princippet) er kendetegnet ved anvendelse af pumpe, der gennem et rør gående fra overfladen til hypolimnion (bundvandet) suger iltfattigt vand op. Det iltfattige vand sendes retur til hypolimnion med stor hastighed under indsugning af atmosfærisk luft. Det vurderes dog, at denne teknik vil være væsentlig dyrere end løsningen med tilsætning af ren ilt til søen, da der er tale om store fysiske aggregater placeret flydende eller nedsænket i søen.

Iltning i søen med ren ilt vurderes således som den mest fordelagtige metode ud fra en helhedsbetragtning omfattende faktorer som:

- effektiv tilførsel og fordeling af ilt
- operationelt og driftssikkert anlæg, der er let at vedligeholde
- ringe forstyrrelse af springlaget, der adskiller det varme overfladevand fra det kolde bundvand
- ingen skader på fisk p.g.a. overmætning med kvælstof
- anlæggets placering på Stavnsholt Renseanlæg og driften af anlægget medfører meget begrænsede miljømæssige gener i form af støj og lugt og visuel påvirkning
- forholdsvis lave anlægs- og driftsomkostninger

Ilten leveres i flydende form til et landanlæg (kryoanlæg), der foreslås placeret på Stavnsholt Renseanlæg. Fra kryoanlægget tilføres ilten bundvandet til de tre søafsnit, der udgør de dybe dele af Furesøen. De diffusorer, der fordeler ilten i bundvandet, er udlagt i de dybeste dele af disse afsnit.

Det anslås, at anlægget kan etableres til en pris på 3,75 mill. kr. Efterhånden som Furesøens miljøtilstand forbedres, vil behovet for ilttilførsel falde. Det anslås således, at driftsomkostningerne vil falde fra 1,9 mill. kr. det første driftsår til 0,7 mill. efter at iltningen har varet i 10 år.

Anlægget kan være sat i drift ca. 8 mdr. efter en politisk beslutning om at igangsætte projektet.

1. INDLEDNING

Frederiksborg Amt og Københavns Amt har bedt Fishcon Aps om at gennemføre en detailprojektering af ilttilførsel til Furesøen.

I rapporten "Restaurering af Furesø – Forprojekt" (Københavns Amt, 1999) har COWI belyst mulighederne for gennem sørestaurering at forbedre Furesøens tilstand. Af rapporten fremgår, at to faktorer er hovedårsagen til den utilfredsstillende tilstand i Furesøen:

- En uhensigtsmæssig sammensætning af fiskebestanden.
- En stor fosforpulje der gennem årene er ophobet i bunden af søen som et resultat af årtiers spildevandsbelastning.

Furesøen er med en maksimaldybde på 37 m landets dybeste sø. Den rummer enestående livsbetingelser for en række dyr og planter, hvoraf flere arter ikke findes andre steder i Danmark.

I Københavns og Frederiksborg Amters regionplaner er søen målsat som badevandssø og som særligt naturvidenskabeligt interesseområde. På trods af, at den eksterne næringsstofbelastning fra oplandet er reduceret markant, er søens tilstand ikke tilfredsstillende. Hovedparten af tiden er søen klarvand, men der sker af og til tilbagefald, hvor søen i en periode præges af uklart vand. Der optræder årligt iltsvind i bundvandet og forekomsten af blågrønalgler medfører i perioder, at badning må frarådes. Af detailprojektet for biomanipulation i Furesøen fremgår, at Furesøen's målsætning ikke kan forventes opfyldt, med mindre biomanipulation kombineres med et indgreb overfor frigivelsen af fosfor fra søens bund i sommerhalvåret (intern belastning).

I det følgende er indeholdt et detailprojekt for ilttilførsel til Furesøen udarbejdet af Fishcon Aps i samarbejde med Carl Bro A/S. I detailprojektet er ilttilførslen foreslået gennemført ved iltning i søen med ren ilt. Detailprojektet rummer detaljerede beskrivelser af anlæggets tekniske opbygning og materiel, således at disse beskrivelser kan udgøre de vigtigste dele i et udbudsmateriale for etablering af anlægget. Selv om driften af anlægget ikke forventes at indgå i udbudet, er der redegjort for driften af anlægget i detailprojektet. Der er udarbejdet et detaljeret overslag over projektets anlægs- og driftsudgifter. Endelig er der redegjort for det langsigtede perspektiv i sørestaureringen ved anvendelse af hypolimnisk ilttilførsel.

Der kan tilføres ilt til søer ved en række andre metoder end iltning i søen med ren ilt. Disse metoder er gennemgået og sammenlignet med iltning i søen med ren ilt.

I projekteringen er der taget højde for de problemer, der kan opstå i forbindelse med et tidsligt overlap af biomanipulation og iltning. Det er således muligt at foretage befiskninger i vinterhalvåret med forskellige fiskeredskaber som trawl, vod og nedgarn uden, at der skal tages vidtgående hensyn til iltningssystemet. Dette sikres ved at:

- forsyningsledningerne nedspules eller –pløjes i søbunden
- diffusorerne tages op om efteråret og udlægges først igen om foråret
- arbejdsflåden kan anvendes ved håndtering af redskaber anvendt ved biomanipulationen.

I Danmark har erfaringerne med iltning af bundvandet i søer været koncentreret om Hald Sø, der til gengæld har mange lighedspunkter med Furesøen. De positive resultater fra 16 års tilførsel af ilt til Hald Sø ved iltning i søen med ren ilt er anvendt som dokumentation for metodens anvendelighed også i Furesøen.

Erfaringerne med den tekniske udformning og fra driften af anlægget i Hald sø, herunder størrelsen af ilttilførslen, fordelingen af iltten i bundvandet og den resulterende miljøforbedring, er en væsentlig del af grundlaget for udformningen af detailprojektet

2. BAGGRUNDEN FOR ILTILFØRSEL TIL FURESØEN

Formålet med tilførsel af ilt til Furesøens bundvand er at:

- reducere den interne frigørelse og belastning med fosfor
- via det lavere fosforniveau at reducere produktionen af planteplankton
- via den lavere produktion af planteplankton og tilførslen af ilt at sikre, at tilførslen af organisk stof til søbunden kan omsættes og nedbrydes i et iltholdigt miljø.

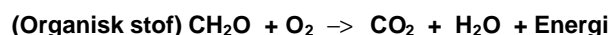
Indgrebet skal således supplere de indgreb, der over en lang årrække er foretaget overfor den eksterne belastning, uden at de har slået afgørende igennem i form af et naturligt og alsidigt dyre- og planteliv og en opfyldelse af målsætningen for Furesøen.

2.1 *Iltforbrug - omsætning af organisk stof*

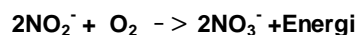
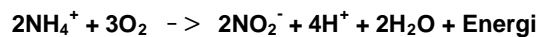
Ilttilførsel til Furesøens hypolimnion hænger nøje sammen med omsætningen af organisk stof. Iltforbruget i Furesøens bundvand styres af tilførslen af organisk stof, som produceres i epilimnion i form af plante- og dyreplankton. Denne produktion sker overvejende i perioden marts-oktober. Omsætningen af det sedimenterede organiske stof sker ved en række processer af både aerob og anaerob art i de øverste få cm af sedimentet

2.1.1 *Aerobe processer*

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



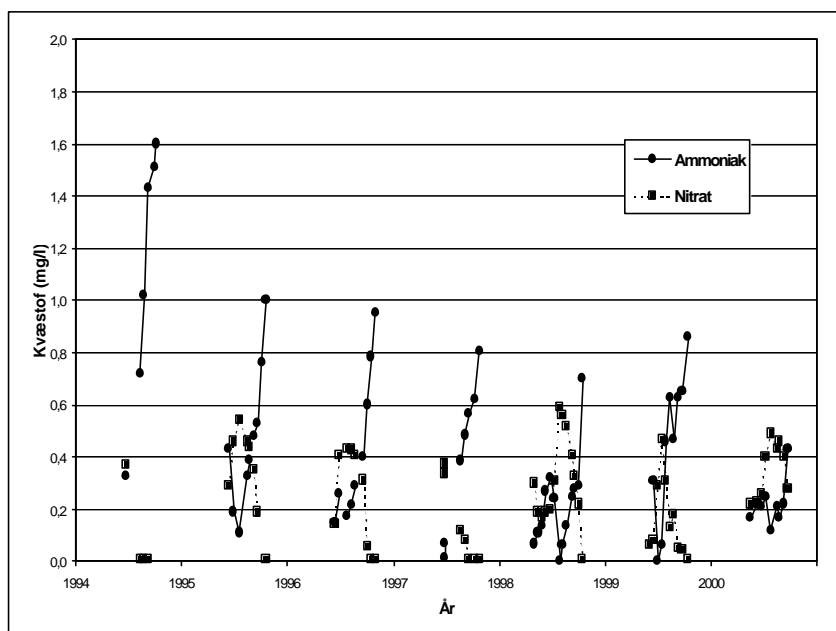
Iltten forbruges imidlertid ikke alene ved iltrespirationen. Der sker også en *nitrifikation*, hvor ammoniak (NH_4^+), der dannes ved nedbrydning af organisk stof, oxideres til nitrat (NO_3^-) ved en bakteriologisk proces:



Den frigjorte energi anvendes til en chemosyntese, hvor CO_2 assimileres som ved en fotosyntese med opbygning af organisk stof.

Iltforbruget ved nitrifikationen er betydeligt. Der medgår ud fra støkiometrien i ovennævnte således 3,4 milligram ilt pr. milligram ammonium, der omdannes til nitrat.

Betydningen af nitrifikationen i Furesøens bundvand fremgår tydeligt af *figur 1*. Her ses hvert år en stigning i nitratkoncentrationen i forsommeren på 200-400 $\mu\text{g NO}_3\text{-N/l}$. Dette skyldes nitrifikationen af den ammoniak, der dannes ved nedbrydningen af forårets produktion af kiselager og stilkalger, der tilføres hypolimnion i perioden marts-begyndelsen af juni. Nitrifikationen standser på tidspunktet, hvor hypolimnions iltindhold nærmer sig 0 mg $\text{O}_2\text{/l}$.

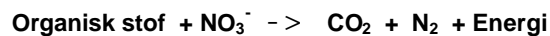


Figur 1. Den tidsmæssige variation i koncentrationen af ammoniak (NH_3) og nitrat (NO_3^-) i Furesøen i perioden 1994-2000 i 30-36 m dybde.

2.1.2 Anaerobe processer

Iltkoncentrationen falder i de øverste par cm af sedimentet til 0 mg O₂/l, og de anaerobe processer overtager nedbrydningen af det organiske stof.

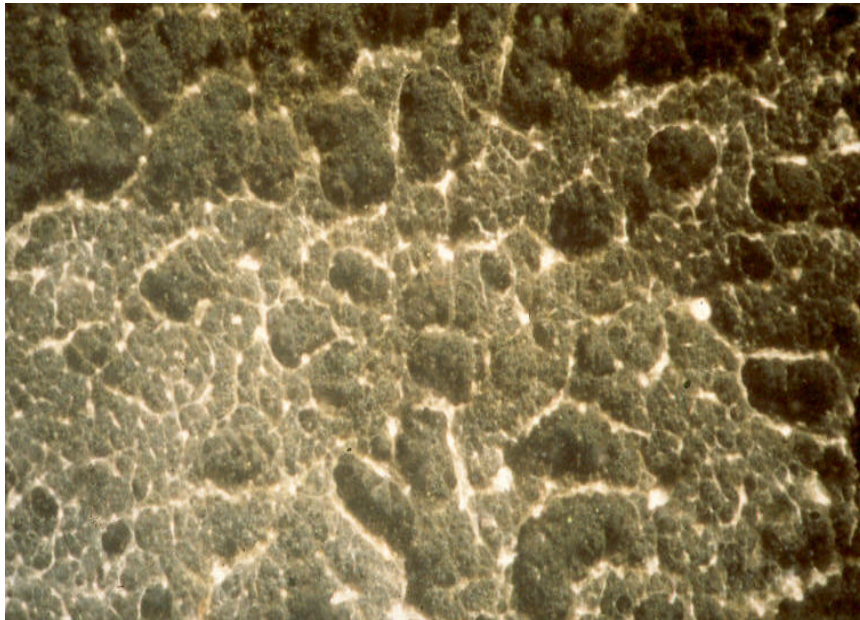
De aerobe processer foregår ved et redoxpotentiale (E_h) på +0,45 < E_h < +0,6 volt. Ved lavere redoxpotentiale finder man følgende anaerobe nedbrydningsprocesser:



Denne *denitrifikation* eller *nitratrespiration* har afgørende betydning i hypolimnion og foregår i redoxpotentialeintervallet +0,4 < E_h < +0,2 volt.

Af *figur 1* fremgår, at nitratindholdet, der i forsommeren når 400-600 µg NO₃-N/l som følge af nitrifikationen, efterfølgende falder til 0 µg NO₃-N/l i hypolimnion i løbet af stratifikationen.

På tidspunktet, hvor nitratkoncentrationen falder til under 200 µg NO₃-N/l, falder redoxpotentialet over sedimentoverfladen samtidig til under +0,2 volt. Det oxiderede, få millimeter tykke, gulbrune grænselag i sedimentets overflade ændres hurtigt nedefra.



Figur 2. "Ligklæde" med "kratere" af gennemboblet methangas i Hald Sø 1984 på 25 m dybde (Foto: Leo M. Nielsen).

Her forløber nedbrydningen af det organiske stof videre under reduktion af mangan ($\text{Mn}^{4+} \rightarrow \text{Mn}^{2+}$), jern ($\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$), sulfat ($\text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{S}$) og kuldioxid ($\text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4$).

Ved overgangen til anaerob nedbrydning af det organiske stof bevæger den reducerende zone i sedimentet sig opad og når hypolimnions bundnære vandmasser. Visuelt ses dette som et farveskifte fra gulbrunt til mørke grønt til kulsort. Dette skyldes reduktionen af det gulbrune ferrijern (jern-3, Fe^{3+}) til ferrojern (jern-2, Fe^{2+}), manganmangan (Mn^{4+}) til manganomangan (Mn^{2+}) og sulfat (SO_4^{2-}) til sulfid (S^{2-}). Den gulbrune sedimentoverflade skyldes jernets forbindelser som ferrihydroxider og oxider og den sorte især sulfid.

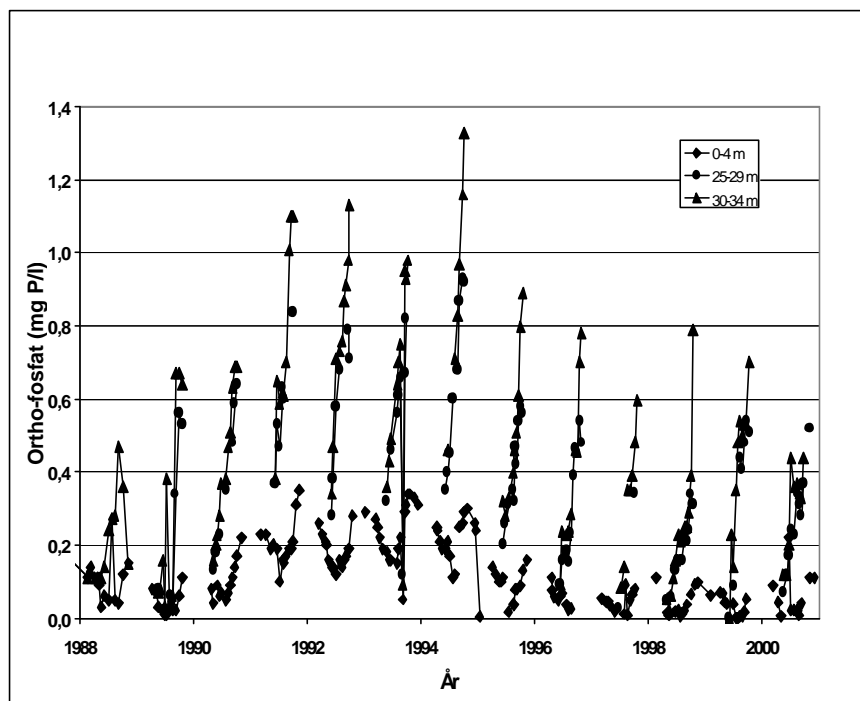
Undertiden ses på dette tidspunkt i den fremadskridende udvikling mod stadig mere og mere reducerende forhold (udvikling mod negativt redoxpotentiale over sedimentfladen) ofte et såkaldte "ligklæde" på sedimentoverfladen. Det drejer sig om et tæt netværk af forskellige slags bakterier, bl.a. svovlbakterier, der ses som et gråligt – hvidt lag. Meget iøjnefaldende er dette ligklæde ved ændringer i det atmosfæriske lufttryk. Ved fald i lufttrykket opstår et "månelandskab" på bunden, idet især akkumuleret methan frigøres som millimeter-centimeter store bobler, der gennembryder sedimentoverfladen og bakterietæppet (*figur 2*).

Ved den fremskredne iltmangel diffunderer betydelige mængder af de reducerende stoffer op i de nederste dele af hypolimnions vandmasser. Her vil de ved de termiske vandbevægelser i hypolimnion komme i kontakt med de resterende iltmængder og oxideres under iltforbrug. I *tabel 1* er angivet iltforbruget ved oxidation af en række betydende reducerende stoffer i hypolimnion og sedimentet.

Af resultaterne af Københavns Amts overvågning af miljøtilstanden i Furesøen fremgår, at længden af perioden med temperaturspringlag er ca. 150 dage om året plus/minus 10 dage.

Reducerende stof	Produkt efter oxidation	Forbrug (mg O ₂ /mg af stof)
Ferrojern	Ferrijern	0,14
Manganomangan	Manganmangan	0,29
Sulfid	Sulfat	2,00
Methan	Carbondioxid	4,00

Tabel 1. Iltforbrug ved oxidation af en række reducerende stoffer i hypolimnion og sediment.



Figur 3. Den tidsmæssige variation i koncentrationen af uorganisk fosfor i hypolimnion og overfladen i Furesøen

Temperaturspringlaget etableres i sidste halvdel af maj måned og nedbrydes i slutningen af oktober-begyndelsen af november.

Jernets dynamik i sedimentoverfladen har stor betydning for binding af fosfor. Uorganisk fosfor bindes meget effektivt til ferrijern som jernfosfater eller jernhydrogenfosfater ved tilstedeværelse af ilt eller tilstrækkeligt høje koncentrationer af nitrat, der skaber et redoxpotentiale større end +0,2 volt. Ved reducerende forhold frigøres det jernbundne fosfat og diffunderer op i søvandet.

I figur 3 er vist den tidsmæssige variation i koncentrationen af uorganisk fosfor i hypolimnion i Furesøen. Hvert år sker der en frigørelse af uorganisk fosfor fra sedimentet fra forsommeren til tidspunktet for totalcirkulation omkring 1. november. Målingerne viser, at koncentrationerne til et hvert tidspunkt i lagdelingsperioden stiger jo tættere, man kommer til bunden. Tilførsel af ilt ved totalcirkulationen i november medfører, at jern igen danner ferrijern, der effektivt binder fosfat. Ferrifosfaten bindes i partikler og tilføres sedimentet.

2.2 *Effekt af ilttilførsel*

Ilttilførsel til hypolimnion har en lang række virkninger på miljøet i en dyb sø. Der er hurtige, næsten momentane virkninger af kemisk og fysisk art og mere langsigtede af biologisk art.

I den efterfølgende gennemgang af effekten af ilttilførsel er erfaringerne fra ilttilførslen til Hald Sø sammenholdt med Furesøen med udgangspunkt i en sammenligning af lagdelingsforhold, sedimentkemi og ekstern belastning for de to søer. Formålet er at vurdere effekten af ilttilførsel på Furesøens kemiske og biologiske forhold.

Erfaringerne med effekten af ilttilførsel til lagdelte søer var begrænsede ved igangsætningen af iltningen af Hald Sø i 1985. I perioden frem til i dag er der derfor udført en række tilpasninger af den tekniske udformning og forsøg med tilpasning af den tilførte iltmængde.

Forbedringerne af den tekniske udformning af anlægget i Hald Sø indgår i den tekniske udformning af anlægget til Furesøen. Erfaringerne med tilførsel af varierende iltmængder til bundvandet i Hald Sø indgår i vurderingen af, hvor meget ilttilførslen kan nedtrappes over årene.

2.2.1 *Kemi*

Ilt

Umiddelbart forventes det, at iltindholdet øges ved kunstig tilførsel af ilt. Imidlertid er det teknisk vanskeligt i en fremskreden eutrofieringssituation at øge iltindholdet i hypolimnion på grund af de stærkt iltforbrugende processer. Samtidig er det et problem at få fordelt den tilførte ilt med samme tempo, som den forbruges.

I Hald Sø har fokus været lagt på at sikre, at nitrifikation og nitratrespiration opretholdes, så lækage af jernbundet fosfor fra sedimentet til vandfasen undgås. Den samme strategi forelås for Furesøen. I perioden er der gjort forsøg med gradvis aftrapning af ilttilførslen.

Baggrunden for, at ilttilførslen kan nedtrappes, er:

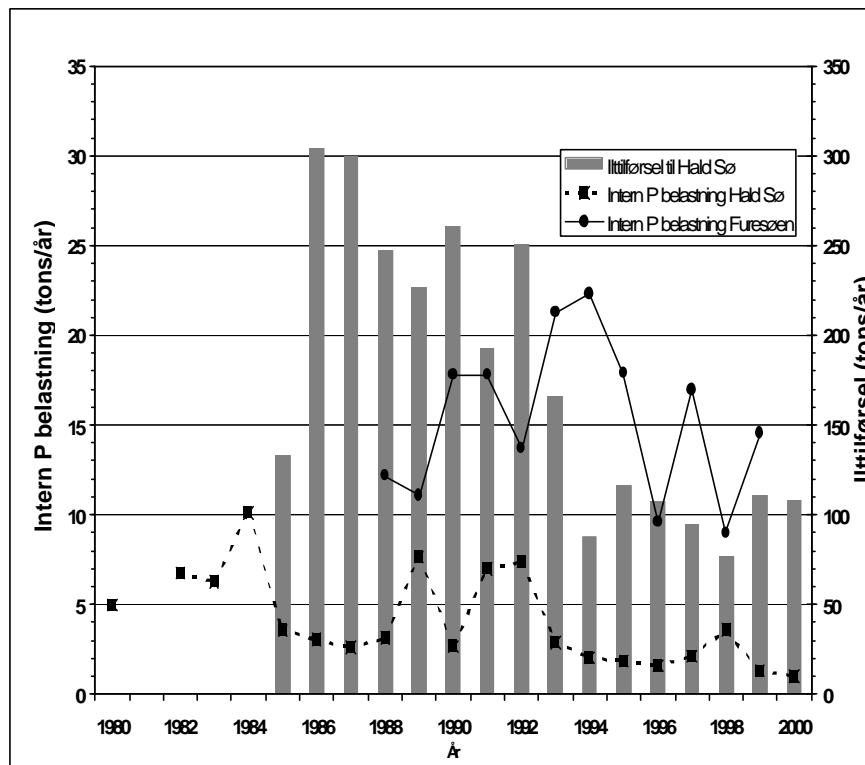
- at det letomsættelige organiske stof omsættes hurtigere ved højere redoxpotentialer, og der dermed etablerer sig en ny ligevægt mellem indholdet af letomsætteligt organisk stof i sedimentet og redoxpotentialiet.
-

- at tilførslen af organisk stof til sedimentet falder i takt med, at algerne primærproduktion begrænses af et faldende indhold af fosfor i epilimnion.

Ammoniak og nitrat

En af grundene til, at det er vanskeligt at sikre et højt iltindhold i hypolimnion ved kunstig tilførsel af ilt, er, at iltforbruget til nitrifikationen er stærkt forøget i forhold til forholdene før ilttilførslen. Dette skyldes, at tilførsel af ilt medfører en stigning i respirationen i hypolimnion og sedimentet på grund af de store mængder af let omsætteligt organisk stof. Dette medfører igen en stor frigørelse af ammoniak gennem den forøgede omsætning af organisk stof.

I Furesøen må påregnes, at ammoniakkoncentrationen i hypolimnion vil reduceres med 50-75 % og nitratkoncentrationen øges tilsvarende, så redoxpotentialen i hovedparten af sommerstagnationen kan holdes over $E_h = 0,2$ mV.

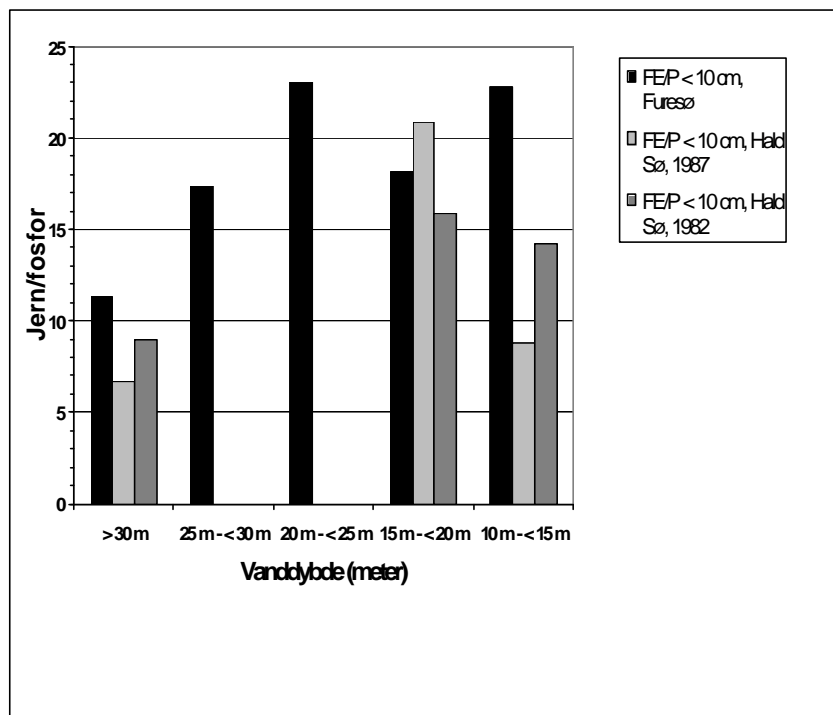


Figur 4. Den tidsmæssige variation i den interne fosforbelastning i Furesøen sammenlignet med Hald sø.

Fosfor

Hovedformålet med tilførsel af ilt til bundvandet er at reducere sedimentets fosforfrigivelse. Iltningens effekt på koncentrationen af fosfor i hypolimnion og epilimnion vil være dramatisk i Furesøen. I Hald Sø er gennemsnitskoncentrationen af fosfor i hypolimnion under sommerstagnationen for total-P's vedkommende faldet fra ca. 500 µg P/l før iltningens start i 1985 til næsten en tiendedel i 2000 (55 µg P/l). I overfladen er der sket tilsvarende fald fra en sommermiddelkoncentration på 100-160 µg P/l før iltningens start til under 30 µg P/l i de seneste 4 år. I 1989, 1991, 1992 og 1997-1998 blev der gjort forsøg med periodisk reduktion af ilttilførslen. Dette udløste straks frigørelse af fosfor fra bunden. For orthofosfats vedkommende ses samme udvikling. I de seneste 6 år (1995-2000) har sommermiddelkoncentrationen af uorganisk fosfor i overfladen været under 10 µg P/l.

Den dramatiske effekt af ilttilførsel på den interne fosforbelastning fremgår af figur 4. Før 1985 var den interne fosforbelastning i Hald Sø øget til 5-10 tons P/år. Gennemsnittet for de sidste 5 år har været 1,9 tons P/år svarende til, at den interne P belastning er



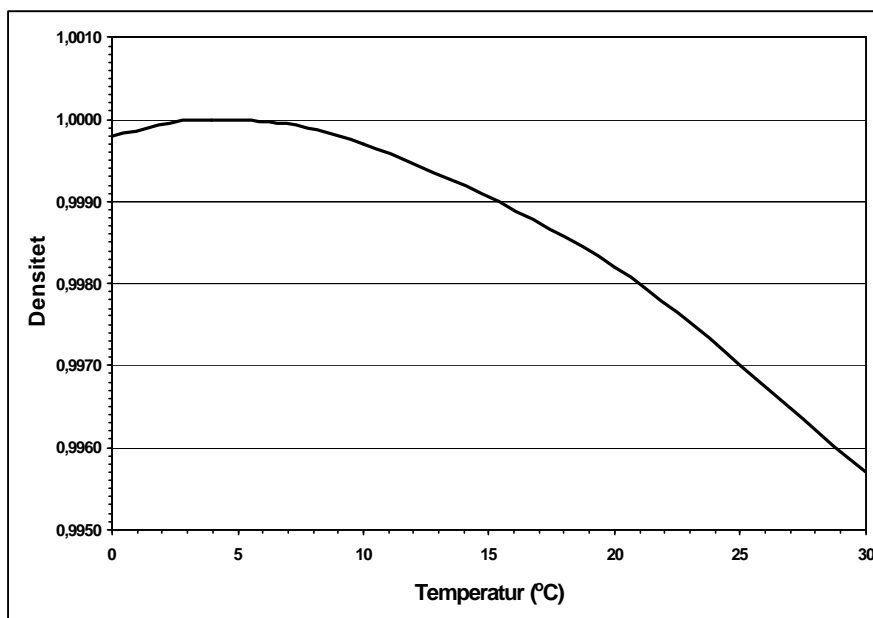
Figur 5. Sammenligning af jern: fosfor forholdet i den øverste del af sedimentet i Furesøen og Hald Sø

reduceret med 70-80 % i forhold til forholdene før iltningens start. I perioden har der været et forholdsvist jævnt fald i den interne belastning, bortset fra årene 1989, 1991 og 1992, hvor der blev gennemført forsøg med at lukke for ilten sent i perioden for at skabe aflastning af fosforpuljen efter totalcirkulationen. Lukningen for ilttilførsel i september-oktober skabte straks øget intern fosforbelastning. Dette ses igen i 1997-98, hvor lignende forsøg blev gennemført. Resultatet af forsøgene viste, at en tilførsel på godt 100 tons O_2 /år var nødvendig for at forhindre en intern belastning på over 1 ton P/år.

Det har været fremført, at der kan blive behov for tilførsel af jern til Furesøen for at øge sedimentets fosforbindingskapacitet, d.v.s. for at sikre, at der er tilstrækkeligt store mængder jern til at fælde fosfor (Københavns Amt, 1999). I *figur 5* der vist en sammenligning af jern : fosfor forholdet imellem de to søer. Af analyserne af Fe/P forholdet i de øverste 10 cm af sedimentet fremgår, at udgangsniveaulet er bedre for Furesøen end for Hald Sø. Fe/P forholdet ligger i Furesøen væsentligt over niveauet i Hald Sø med undtagelse af et enkelt dybdeinterval.

2.2.2 Fysiske forhold

Indvirkningen på de fysiske forhold afhænger meget af metoden, der anvendes og vil blive uddybet under beskrivelsen af de forskellige metoder. Interessen for omfanget af den fysiske påvirk-

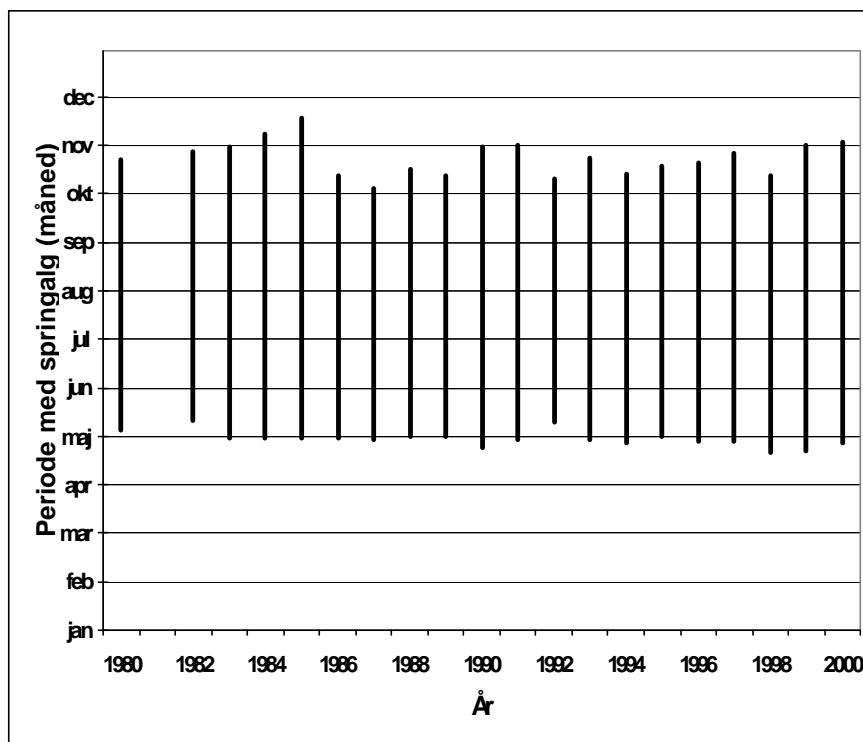


Figur 6. Temperaturens betydning for ferskvands densitet.

ning knytter sig især til påvirkningen af de basale fysiske forhold, der betinger levevilkårene for dyre- og plantesamfundene og dermed for hele søens økologiske tilstand. Det drejer sig især om påvirkningen af de hydrauliske forhold i søen, der har stor betydning for temperaturlagdelingen. Alle løsninger, der kan anvendes til tilførsel af ilt, kan ved forkert dimensionering medføre påvirkning af springlaget ved påvirkning af vandbevægelsen i hypolimnion.

I Hald sø er det analyseret, hvordan ilttilførsel ved anvendelsen af diffusorer og ren ilt har påvirket springlaget. Dette er gjort ved at sammenligne længden af stratifikationsperioden før og efter 1985.

Sker der en væsentlig påvirkning af temperaturspringlaget vil det i den værst tænkelige situation betyde en total nedbrydning, d.v.s. en opblanding af vandmasserne, så temperaturforskellene udlignes. Dette ville betyde en temperatur på ca. 13-14 °C fra overflade til bund. Imidlertid er det urealistisk store mængder luft eller ilt (eller rettere energi), der skal til for at nedbryde springlaget, når det er dannet i slutningen af maj. Dette skyldes



Figur 7. Varigheden af perioden med temperaturspringlag i Hald Sø 1980-2000

den store densitetsforskel mellem overfladevandet (15-20 °C, densitet: 0,9987) og bundvandet (8-9 °C, densitet: 0,9998). Der skal således udøves et meget betydeligt arbejde for at "løfte" hypolimnisk vand op gennem metalimnion til epilimnion, vand der er 1,1 kg tungere pr. m³ end det epilimnisk vand (*figur 6*).

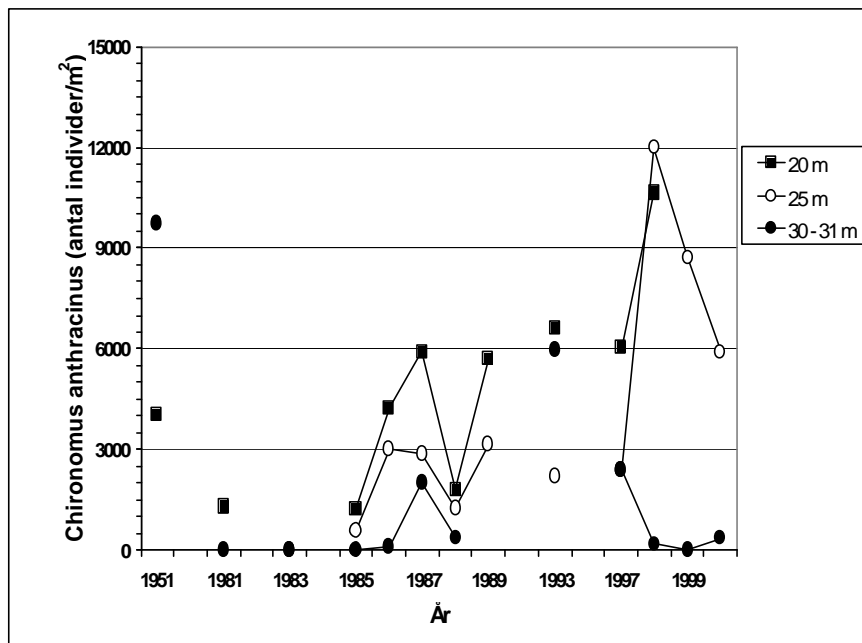
Mere sandsynligt er det, at påvirkningen i stedet betyder en afkortning af længden af perioden, hvor der er temperaturspringlag. Imidlertid er der, som det fremgår af *figur 7* ikke en påviselig afkortning af perioden med springlag i Hald Sø.

2.2.3 Biologiske forhold

De biologiske forhold i søen påvirkes i stort set alle fødekædens led.

Fytoplankton

Gennem reduktion af den interne belastning reduceres produktionen af fytoplankton. Den kvalitative sammensætning ændres således, at de næringskrævende arter af blågrønalger *Anabaena*, *Aphanizomenon* og *Microcystis* og den store furealge *Ceratium* erstattes af arter, der favoriseres af lav fosfortilgænge-



Figur 8. *Udviklingen i bestanden af dansemyggelarver af arten Chironomus anthracinus i Hald Sø i perioden 1951-2000*

lighed. Det drejer sig om arter af kiselalger og grønalger bl.a. *desmidiacéer*. Artsantallet i Hald Sø steg i de første år efter iltningens start fra 34 til 66 arter. Nygaards planktonkvotient faldt fra 9 til 5.

Bundfauna

Forekomsten af dansemyggelarver af den ”dybtvandselskende” art *Chironomus anthracinus* (tidl. *bathophilus*) er en biologisk indikator for forbedringerne af de miljømæssige forhold i hypolimnion.

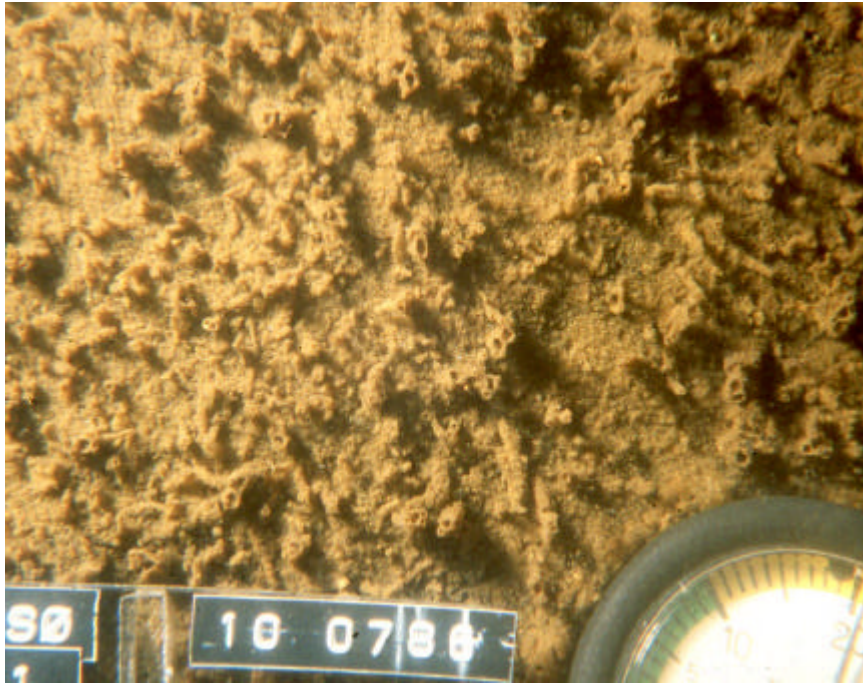
Larverne af *Chironomus anthracinus* er tilpasset livet i overfladesedimentet i hypolimnion med svingende og ofte lavt iltindhold. Der er imidlertid grænser for, hvor længe larverne kan leve ved iltindhold i nærheden af 0 mg O₂/l (Hamburger, K. et al 1995).

Arten spiller en stor rolle for de økologiske forhold i dybe søer som Furesøen og Hald Sø. Den meget store tæthed på ofte 10-15.000 individer pr. m² bevirker ved dyrenes bevægelser en tilførsel af friskt vand med ilt til sedimentet.

Selve produktionen er også stor. For Furesøens vedkommende vil en ilttilførsel forbedre forholdene væsentligt. Det kan således påregnes, at der vil kunne produceres mindst 100 tons myggelarver pr. år på den del af Furesøens bund med levemuligheder for arten, ca. 400 ha (eks. 5.000 larver pr. m² á 5 mg = 25 g pr m² eller 250 kg pr. ha). En del af produktionen ædes som larver af fisk. En endnu større del, måske halvdelen, fjernes fra søen ved, at de ædes som pupper eller som voksent insekt af fugle som svaler og hættemåge, eller ved at de går tabt på land i forbindelse med parringen i begyndelsen af maj. Der er ikke lavet særlig mange studier over størrelsen af den fosformængde, der fjernes ved ovennævnte. Antages fosforindholdet i myggene at være i størrelsesordenen 0,3 % kan der således meget vel være tale om en fjernelse af fosfor fra søen på et par hundrede kg/år.

I Hald Sø afspejlede udviklingen i bestanden af myggelarver over en 30 års periode eutrofieringsudviklingen og den afledede stigende iltmangel.

I figur 8 er vist den tidsmæssige variation i antallet af myggelarver pr. m² på 30 meters vanddybde i perioden 1951-2000. Efter ilttilførsels start er bestanden øget i store dele af hypolimnion.



Figur 9. Dykkerfoto af bunden på 21 m dybde i Hald Sø i højsommeren med rør af *Chironomus anthracinus* (Foto: Leo M. Nielsen, 10. juli 1986)

Det har vist sig at være svært for bestanden at genetablere sig på de største dybder. Dette kan skyldes substratændringer, idet det meget finkornede sorte slam, der har hobet sig op på 30 m dybde, er et vanskeligt levested for chironomidelarverne.

I figur 9 er vist et dykkerfoto fra 21 m. Her ser man de talrige rør, hvori myggelarverne lever. Bemærk det iltede overfladesediment til sammenligning med forholdene på fotoet med "ligklædet" i figur 2.

3. FURESØENS ILTTBEHOV

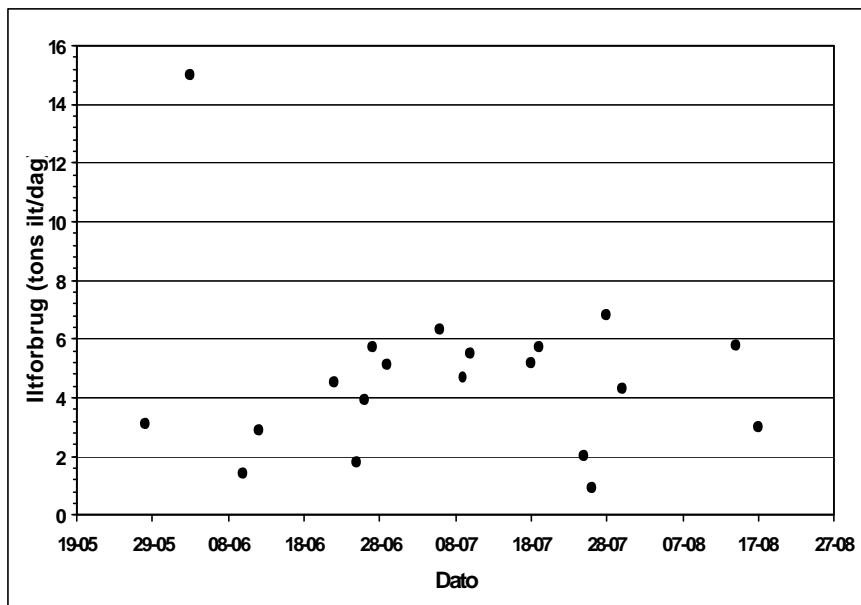
Iltbehovet i hypolimnion under stratifikationen, d.v.s. den mængde ilt, som skal til for at undgå iltmangel, er af Cowi anslået til i alt ca. 1.000 tons ilt pr. år (Københavns Amt, 1999).

Ved vurderingen af, hvor meget ilt, der skal tilføres Furesøen er det væsentligt at skelne mellem følgende definitioner:

- *Iltforbrug*: den mængde ilt, der forbruges uden ilttilførsel i stratifikationsperioden.
- *Iltbehov*: den mængde ilt, der er behov for, så der ikke er iltmangel i hele stratifikationsperioden.

3.1 Beregning af Furesøens iltbehov

Iltforbruget kan beregnes ud fra ændringen i den totale iltmængde i hypolimnion mellem 2 på hinanden følgende tidspunkter af temperaturlagdelingen. Det gennemsnitlige iltindhold i hypolimnion falder typisk fra 12-13 mg O₂/l ved stratifikationens start til under 1 mg O₂/l som gennemsnit for hypolimnion begyndelsen af august. Volumen i hypolimnion varierer ved stratifikationens

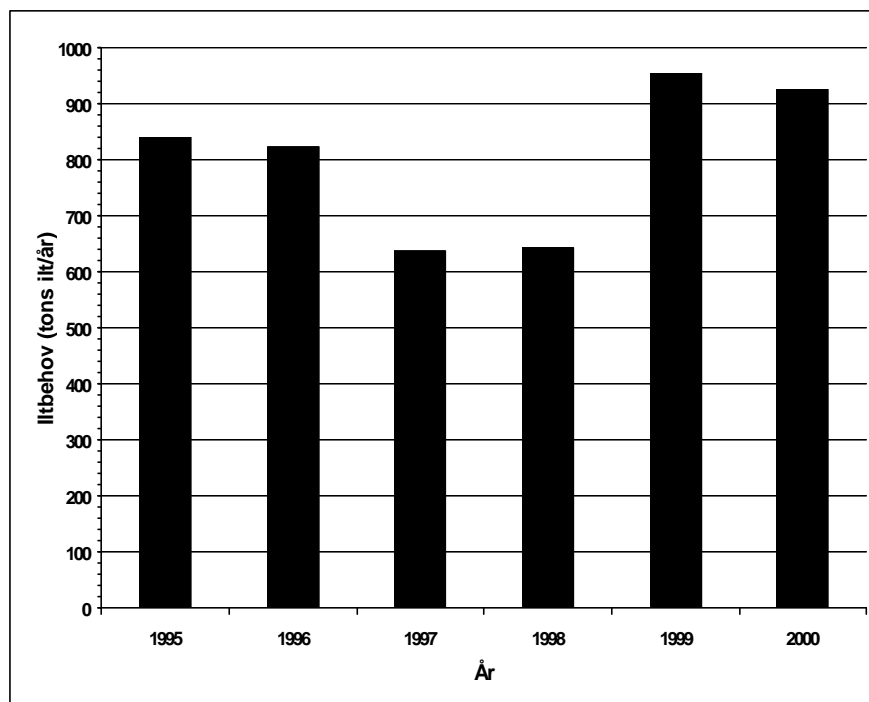


Figur 10. Det daglige iltforbrug i hypolimnion i Furesøen beregnet ud fra profilmålinger i årene 1995-2000.

start fra 40-70 mio. m³ afhængig af temperaturspringlagets beliggenhed. Dette svarer til, at der i midten af maj som middel er ca. 500 tons ilt til rådighed for sommerhalvårets iltforbrug i hypolimnion.

I forbindelse med NOVA-programmet er der målt iltprofiler ca. hver fjortende dag i en lang årrække. Ud fra dybdekortets volumenopgørelser beregnes iltpuljerne. Opgørelse af iltforbruget kan gennemføres fra stratifikationens start til ca. begyndelsen af august. På dette tidspunkt bliver iltkoncentrationen i de dybeste vandmasser for lav, og estimerne vil herefter ikke give det "sande" (potentielle) iltforbrug.

I figur 10 er vist variationen i perioden maj-august i det daglige iltforbrug i Furesøen bestemt ud fra målinger i de sidste 6 år: 1995-2000. Målinger, der viser et negativt iltforbrug, d.v.s. en stigning i iltindholdet under stratifikationen er udeladt og tilskrives fejlmålinger (elektrodefejl ?). Af figur 10 fremgår, at det gennemsnitlige iltforbrug varierer fra 0,9 til 15 tons ilt/døgn. Gennemsnittet af alle estimerne giver et forbrug på 4,7 tons ilt/døgn.



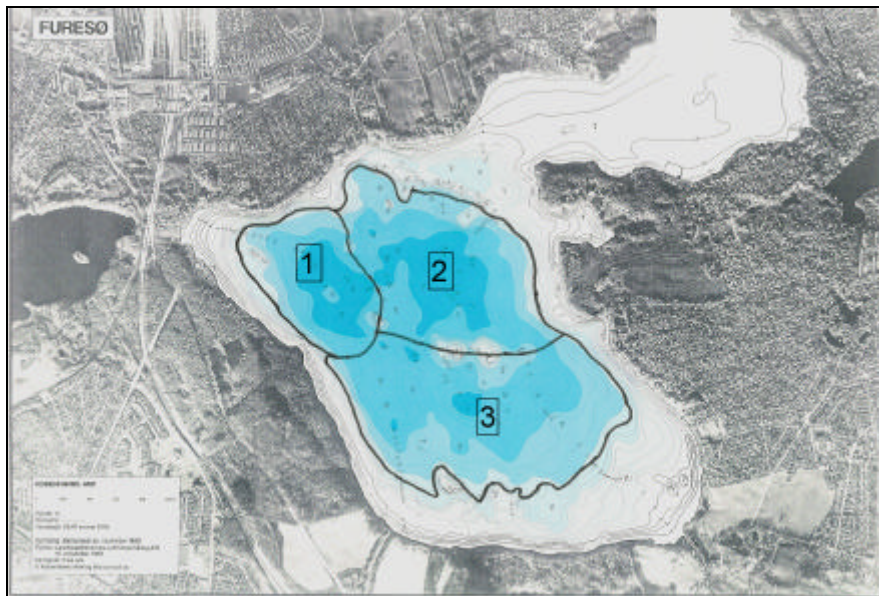
Figur 11. Det beregnede iltbehov i Furesøens hypolimnion i perioden med temperaturlagdeling for årene 1995-2000.

Som det fremgår af *figur 10*, er der ikke nogen klar tendens i det daglige iltforbrug i løbet af sommeren, hvilket sandsynligvis skyldes den konstant lave temperatur i hypolimnion, der i høj grad bestemmer bakteriernes og bunddyrenes fordøjelseshastighed og vækst og dermed iltoptagelse. Der kan også være tale om en ret konstant tilførsel af organisk stof fra epilimnion i den aktuelle periode.

Furesøens *iltbehov* kan herefter beregnes ud fra kendskabet til det daglige iltforbrug og længden af perioden med temperaturlagdeling i søen:

$$\text{Iltbehov} = \text{iltforbrug pr. døgn} * \text{antal døgn med temperaturlagdeling}$$

I *figur 11* er vist det beregnede iltbehov i Furesøens hypolimnion i perioden med temperaturlagdeling for årene 1995-2000. Der er ikke tegn på stigende eller faldende tendens. Iltbehovet har i perioden varieret mellem ca. 640 tons ilt pr. år og godt 950 tons ilt pr. år. Det gennemsnitlige iltbehov har været godt 800 tons ilt pr. år. Afvigelsen fra Cowi's estimat kan ikke betegnes som stort, idet dette er baseret på et enkelt års målinger foretaget i 1993. I 1999 og 2000 var iltbehovet således over 900 tons pr. år. Det vurderes derfor, at et iltbehov på ca. 1000 tons pr. år vil være et udmærket dimensioneringsgrundlag for det tekniske udstyr, der skal bruges ved tilførsel af ilt til Furesøen.



Figur 12: Dybdekort over Furesøen med den omtrentlige bassinopdeling.

3.2 Beregning af iltbehovet i de forskellige afsnit af Furesøens hypolimnion

Furesøens hypolimnion opdeles af de undersøiske højderygge og grunde i 3 hovedbassiner som vist i *figur 12*. Af profilmålingerne i søen fremgår, at den øvre del af vandmassen med 6-10 °C i lagdelingens start i slutningen af maj når 8-10 m dybdekurverne. I sommerens løb eroderes den øvre del af hypolimnions kolde vand og opblandes med epilimnisk varmt vand. Som middel ligger temperaturspringlaget i 14 m dybde. Ved lagdelingens slutning i oktober ligger den øvre del af det hypolimnisk vand i 18-20 m dybde.

I *tabel 2* er vist de morfometriske data for hvert bassin opgjort ud fra estimater fra det udarbejdede dybdekort over søen (Københavns Amt 1989).

Arealet for de enkelte bassiner er opgjort ved "kvadrat-metoden" (Monkhouse, F. J. and H. R. Wilkinson, 1969). Bassin 1 er det mindste med et areal på ca. 88 ha. Den hypolimnisk middeldybde er 11,9 m, og volumen er ca. 10,5 mio. m³. Bassin 2 er større og har mere varierende dybdeforhold. Arealet er ca. 143 ha. Den hypolimnisk middeldybde er 11,2 m, og volumen er ca. 16 mio. m³.

Bassin	1	2	3	I alt
Areal under springlag (hektar)	88	143	183	414
Volumen under springlag (10 ⁶ m ³)	10,48	15,95	14,95	41,38
Middeldybde (m)*	11,9	11,2	8,2	10,0
Maks. volum. dagl. iltbehov (kg)	2.530	3.860	3.610	10.000
Maks. arealmæs. dagl. iltbehov (kg)	2.130	3.450	4.420	10.000

*Middeldybde under 14 m kurven i springlagsperioden.

Tabel 2. Morfometriske data for hypolimnions 3 bassinafsnit samt det maksimale daglige iltbehov for hvert bassin.

Bassin 3 er arealmæssigt det største bassin (183 ha) men forholdsvis lavvandet. Middeldybden i hypolimnion er 8,2 m og volumen ca. 15 mio. m³.

De 3 bassiners iltbehov kan beregnes ud fra en volumetrisk betragtning og ud fra en arealmæssig betragtning. Af afsnit 2 fremgår, at det daglige iltforbrug kan variere mellem 1 og 15 tons ilt pr. dag. Imidlertid er de hyppigste beregnede værdier 5-6 tons ilt pr. dag. Af sikkerhedsgrunde er det valgt at udgangspunkt i en

maksimal daglig tilførsel på 10 tons ilt pr. dag. Det ses, at der er en vis forskel på mængderne, der skal tilføres de 3 bassiner pr. dag afhængig af beregningsmetoden. Iltforbruget i hypolimnion er for langt den overvejende del forårsaget af de aerobe og anaerobe nedbrydningsprocesser knyttet til bakterier, bunddyr og andre organismer, der lever i sedimentoverfladen. Det er derfor i de efterfølgende beregninger og dimensioneringen af anlægget valgt at fordele iltten efter en arealmæssig betragtning.

4. KRAV TIL ILTNINGSANLÆGGET

Et anlæg, der skal tilføre ilt til Furesøen skal opfylde en række krav, der ikke alene tilgodeser ønsket om at tilføre søen ilt i sommerens lagdelingsperiode. Der skal også tages hensyn til anlæggets påvirkning af omgivelserne og rekreative og naturmæssige værdier og interesser.

1. anlægget skal kunne tilføre søen minimum 1000 tons ilt pr. år og op til 10 tons/dag,
2. iltens skal i videst muligt omfang fordeles ligeligt i hypolimnion,
3. springlaget skal forstyrres mindst muligt, således at temperaturen i hypolimnion forbliver lav (8-10 °C),
4. ingen skader på fisk p.g.a. overmætning med kvælstof,
5. anlægget skal være operationelt og driftssikkert,
6. anlægget skal være let at vedligeholde,
7. anlægget skal være let at fjerne,
8. anlæggets placering og drift må ikke give anledning til miljømæssige gener i form af støj og lugt,
9. påvirkningen af de visuelle forhold fra anlæg på land og i søen skal minimeres,
10. lille krav til areal til landanlæg,
11. lave anlægs- og driftomkostninger.

Ad 1: Minimum 1.000 tons ilt pr. år

Iltbehovet i hypolimnion under stratifikation er beregnet til i alt ca. 1.000 tons ilt pr. år.

Ad 2: Fordeling af ilt

Fordelingen af den tilførte ilt i Furesøens tre bassiner, så det matcher med bundvandets og sedimentets iltbehov er afgørende for, at målet med iltningen nås.

Ad 3: Mindst mulig forstyrrelse af springlaget

Opretholdelse af det nuværende forløb af temperaturforhold i Furesøens hypo- og epilimnion under lagdelingsperioden er en afgørende forudsætning for et naturligt dyre- og planteliv i Furesøen, herunder livsbetingelserne for de to arter af krebsdyr, som karakteriseres som istidsrelikter.

Ad 4: Ingen skader på fisk

Der vil være en væsentlig risiko for overmætning med kvælstof i hypolimnion ved beluftning. Tolerancen overfor gasovermætning hos akvatiske dyr, der bevæger sig meget i vertikal retning i søer, er muligvis ringe. Således opstår der akut ”dykkersyge”, hvis

eksempelvis fisk udsættes for en nitrogenovermætning. Fiskene ynder at opholde sig i og lige over springlaget i varme somre. Der vil således være stor risiko for, at disse kan udsættes for gasovermætningen.

Ad 5: Operationelt og driftssikkert anlæg

Driftssikkerhed er en meget vigtig faktor, idet et stop i ilttilførslen, der medfører, at nitraten i bundvandet opbruges ved denitrifikation (nitratrespiration), vil medføre en meget kraftig pulsaftig frigivelse af fosfor fra sediment til vandfasen.

Ad 6 og ad 7: Anlæg let at vedligeholde og at fjerne

Vedligeholdelsen af anlægget er en vigtig post på driftsbudgettet. Endvidere vil der være bakterievækst på de dele af anlægget, der er i vandet, således at det vil være hensigtsmæssigt at tage det op efter, at lagdelingen er ophørt m.h.p. at rense og tilse det.

Ad 8: Begrænsede gener i form af støj og lugt. Ad 9: Begrænset påvirkning af de visuelle forhold. Ad 10: Arealkrav til landanlæg

Dele af Furesøens bredareal er udnyttet til boligbebyggelse. Den rekreative anvendelse af Furesøen og dens omgivelser er meget intensiv, og søens og dens omgivelser er beskyttet i henhold til Naturbeskyttelsesloven og i henhold til arealudpegninger i regionplanen og i henhold til EU direktiver. Det er således vanskeligt at finde egnede arealer til at placere tekniske anlæg ved søen, og disse skal udformes således, at de ikke udgør et forstyrrende visuelt element samt indrettes og drives således, at de ikke medfører gener i form af støj og lugt.

Ad 11: Anlægs- og driftsomkostninger

Ved udformningen af detailprojektet er der lagt vægt på at minimere omkostningerne til at etablere og drive anlægget.

5. METODER TIL ILTTILFØRSEL

I dette projekt har det været opgaven at projekttere et anlæg til Furesøen efter den metode, der har været anvendt i Hald Sø ved Viborg, d.v.s. iltning med ren ilt i søen.

Der findes en række forskellige metoder, der kan anvendes til tilførsel af ilt til søer.

I det følgende gennemgås indledningsvis de mest almindelige tekniske forslag, der har været fremme i de sidste 15 år ikke blot i relation til Hald Sø projektet men også i relation til Furesø.

Der er ved gennemgangen lagt vægt på en klar beskrivelse af metodens tekniske opbygning og funktion, effekt, dimensioner, omkostninger og til slut en vurdering af metoden i forhold til løsningen af Furesøens miljøproblemer.

De metoder, der teknisk og økonomisk er mest fordelagtige, og som har de færreste miljømæssige, rekreative og visuelle konsekvenser, er mest detaljeret gennemgået.

Beskrivelsen er mindre detaljeret, hvis metoden umiddelbart kan tilskrives så store uheldige miljømæssige konsekvenser eller er økonomisk vanskeligt gennemførlig, at den ikke kan anvendes. Metoden kan også indeholde samme problemstillinger, som andre af de beskrevne, således at disse ikke behøver yderligere gennemgang.

Der beskrives kun metoder, der i ringe omfang påvirker temperaturspringlaget. Metoder, der indebærer en tvangscirkulation af søens vandmasser under sommer-stratifikationen er således ikke medtaget. (Tvangscirkulation af søens vandmasser i vinterperioden, er ikke relevant, da der ikke optræder iltsvind under et evt. islæg).

Der er 2 typer af fremgangsmåder, der kan anvendes til tilførsel af ilt til Furesøens bundvand:

- tilførsel af atmosfærisk luft
- tilførsel af ren ilt.

I det følgende gennemgås en række metoder til ilttilførsel, opdelt efter disse to fremgangsmåder. Selve detailprojekteringen af iltanlægget efter Hald Sø metoden er indeholdt i afsnit 6 med tilhørende bilag.

5.1 Tilførsel af atmosfærisk luft – beluftning

Med begrebet beluftning menes tilførsel af atmosfærisk luft til vand. Overførsel af ilt fra atmosfærens luft sker ved, at man skaber den størst mulige kontaktflade mellem vand og atmosfærens luft. Herved vil ilten på grund af det højere partialtryk i luften end i det iltfattige vand diffundere ind i vandet. Dette kan ske enten ved at findele vandet til dråbestørrelse eller millimetertyndt lag eller ved at sende store mængder fine luftbobler ind i vandet.

Afhængig af kontakttiden vil der indstille sig en ligevægt mellem vandets gaskoncentration og luftens gaskoncentration. Atmosfærisk luft indeholder af relevans for ilttilførsel til søer de 3 gasser ilt (Oxygen, O₂, 20,9 %), kvælstof (Nitrogen, N₂, 78,09 %) og kulsyre (Carbondioxid, CO₂, ~ 0,03 %).

Beluftning anvendes meget i akvakultur, spildevandsanlæg og vandværker, hvor tilførsel af luft sker ved diffusorer placeret i dammene/bassinerne med tilhørende el- eller brændstofdrevet kompressor. Det kan også dreje sig om forskellige land- eller

Gasart	Indhold i % af volumen af atmosfærisk luft	Molekylvægt	Normal kubikmeter vægt *(kg/Nm ³)	Kogepunkt (°C)	Massefylde af væske ved norm. kogepunkt (kg/m ³)
Luft	100	28,96	1,29	-194	875
Ilt (Oxygen, O ₂)	20,95	32,00	1,43	-183	1131
Kvælstof (Nitrogen, N ₂)	78,09	28,02	1,21	-196	810
Kultveilde (Carbondioxid, CO ₂)	0,03	44,01	0,04	-192	801

Nm³ = Normal kubikmeter (0°C, 1013,25 mbar)

Tabel 3: Fysiske data for atmosfærisk luft og dens 3 komponenter ilt, kvælstof og kultveilde.

vandbaserede indblæsningsaggregater, piskeris, blæsere eller risletårne, hvor vandet ved pumpekraft føres over vandspejlet og ved tyngdekraften findeles over et passende medium (plastlegemer, skærver etc.). Det beluftede vand returneres herefter til bassiner. I Tabel 3 er angivet vigtige fysiske data for atmosfærisk luft. Ved tilstrækkelig effektivitet ved den anvendte beluftningsmetode mættes vandet således med ilt, kvælstof og kulsyre.

Temperatur (°C)	Iltindhold (mg O ₂ /l)
3	13,0
6	12,0
9	11,2
12	10,6
15	10,0
18	9,3
21	8,5

Tabel 4: Ferskvands iltindhold ved 100 % iltmætning. Data er fra målinger af vand i et akvakulturanlæg med vanddybde på 0,3 m under konstant beluftning (Fishcon Aps, originale data).

Ilt har ret lav opløselighed i vand. Opløseligheden afhænger af det atmosfæriske lufttryk, det hydrostatiske tryk (vanddybden), indhold af salte, mikroskopiske partikler og især temperaturen.

Af Tabel 4 fremgår således, at opløseligheden ved stigende temperatur falder med omkring 0,25 mg O₂/l pr. 1 °C stigning i temperatur. Datamaterialet er fra et integreret akvakulturanlæg med vandkvalitet og atmosfæreforhold meget lig søvands. I almindeligt anvendte tabeller over iltens opløselighed i vand anvendes ofte rent vand eller destilleret vand i ligevægt med atmosfære mættet med vanddamp.

5.1.1 Beluftning på land

5.1.1.1 Indpumpnings-retursystem med beluftning på land

Et indpumpnings-retursystem med beluftning på land er en metode, der sandsynligvis ikke anvendes mange steder til iltning af søer, idet der ikke er fundet referencer med beskrivelse af anvendelse. Metoden baseres på udlægning af indpumpningsrør og returledningsrør af passende dimension fra hypolimnion til pumpe- og beluftningsstation på land.

Indløbsrøret føres frem til en pumpebrønd ved søbredden. I pumpebrønden er under vandspejlet placeret en dykpumpe, der forsyner beluftningsstation med iltfattigt hypolimnisk vand.

Beluftningsstationen kan være:

- bassinsystem
- risletårnssystem.

Bassinsystem

Bassinsystemet forsynes med vand fra dykpumpen. I bassinerne kan beluftningen foregå på flere måder:

- eldrevne piskere
- diffusorer forsynet med trykluft fra kompressorer

De eldrevne piskere findes i adskillige varianter. Funktionen baseres på, at det indpumpede iltfattige vand findeles til dråber, der slynges 0,5-2 m op i luften. Ved kontakten med atmosfæren optages ilt i dråberne.

Beluftningen kan også foregå ved diffusorer placeret på bunden af bassinerne. Lufttilførsel sker ved anvendelse af trykluft fra kompressorer. Iltningen af vandet sker her ved, at luftboblerne stiger op i vandet under afgivelse af ilt.

I dambrugsdrift anvendes også blæsere af forskellig art f.eks. ringkammerblæsere, der er eldrevne maskiner med rotor, der blæser atmosfærisk luft ind i vandmassen.

Iltningseffektiviteten i beluftningsbassinerne ved brug af piskere eller blæsere afhænger af antal og størrelse af disse samt den tilførte effekt i forhold til vandets opholdstid.

Iltningseffektiviteten ved brug af diffusorer forsynet med trykluft fra kompressor afhænger af kompressorens effektforbrug, diffusor-type og vanddybde i bassin samt vandets opholdstid.

Risletårnssystem

Beluftningen kan også ske ved anvendelse af risletårne i stedet for beluftningsbassiner. Dykpumpen pumper det iltfattige vand op i risletårne, hvori der er placeret et fintdelt materiale i form af skærver eller plastlegemer. Det oppumpede vand risler ned over det findelte materiale. Under rislingen bringes vandet hele tiden i kontakt med nyt iltmættet luft, så der sker en diffusion af ilt til vandet.

Anvendes risletårne af passende højde kan vandets gastryk bringes i ligevægt med luftens. For iltens vedkommende vil man ved brug af risletårne kunne opnå et indhold på ca. 10 mg/O₂/l svarende til en iltmætning på ca. 90 % i returvandet (*Fishcon, upubl. data*).

Ledninger og pumper

Den afgørende del af indpumpnings-beluftningssystemet er pumpekapaciteten. For at leve op til et krav på ilttilførsel på 10 tons ilt/dag skal der pumpes 1 mio. m³/dag (11 m³/sec.) under forudsætning af et hypolimnisk iltindhold på under 1 mg O₂/l. Dimensionering af indløbs- og udløbsledninger er ikke gennemført i dette projekt. Det er dog af væsentlig betydning, at indløbsledningens og udløbsledningens placering er fjernt fra hinanden for at undgå kortslutning. Dette kunne sikres ved, at indtaget placeres over bunden og udløbet få meter under springlaget.

Anlægsomkostningerne er store, måske et tocifret millionbeløb, idet der kræves lange og kostbare rørledninger med meget store dimensioner.

Driftsomkostninger til pumpning af vand er meget store. Det kræver ca. 1 kW for at pumpe 10 liter pr. sec. i et lavtrykssystem af denne art med en lav løftehøjde på få meter. Det kan beregnes, at pumpningen medfører et energiforbrug på ca. 4 kWh/kg O₂, svarende til mindst 4 kr. pr kg tilført ilt. Hertil kommer vedligeholdelse af pumper.

Det kan lade sig gøre at dimensionere et anlæg baseret på indpumpning af vand og beluftning i bassiner eller risletårne, der kan tilføre Furesøen minimum 1000 tons ilt pr. år og op til 10 tons O₂/dag. Ved passende placering af indtag og udløb kan sikres en god fordeling i hypolimnion uden forstyrrelse af springlaget.

Den gode udveksling af vandets luftarter med luftens luftarter i risletårnene betyder en god "normalisering" af luftarternes partialtryk i vandet. Der er således ringe risiko for overmætning med kvælstof.

Der knytter sig store problemer til anlæggets fysiske dimensioner. Rørdimensionerne i indtags- og udtagsledningerne skal være meget store og være af betragtelig længde. Der er rimelig god driftssikkerhed knyttet til anlægget, da denne næsten udelukkende er knyttet til pumpernes funktion. De gængse pumper, der skulle finde anvendelse i et anlæg af denne art, er yderst holdbare med 10-15 års levetid.

Vedligeholdelsen af systemet vil overvejende bestå i servicering af pumper 1 gang om året med vintersikring af pumpebrønd.

De meget store rørdimensioner gør det vanskeligt at etablere og fjerne igen. Der må imødeses betydelige gener for biomanipulationsprojektet og de rekreative aktiviteter.

Placeringen af pumperne i en neddykket pumpebrønd vil reducere støjgenerne fra pumperne væsentligt, imidlertid kræves støjgenedæpende foranstaltninger til forhindring af støjen fra risletårnene.

Der vil ikke være synlig teknik på søen ud over afmærkning af rørføringer.

Samlet vurderet giver indpumpning af vand og opiltning ved risletårne en god normalisering af hypolimnions vand. Imidlertid vurderes projektet at indebære for store anlægsarbejder (og dermed store anlægsomkostninger og visuel påvirkning) til, at løsningen vil være at foretrække.

5.1.2 *Beluftning i søen*

5.1.2.1 *Diffusorer med luftforsyning fra kompressor*

Den mest enkle metode til beluftning af hypolimnion er placering af diffusorer i søen.

Diffusorerne tilføres atmosfærisk luft ved hjælp af en kompressor placeret på land eller på en flåde forankret på søen.

Kompressoren kan være af forskellig type. Det skal dog være et krav, at den lever op til den højeste miljømæssige standard, bl.a. skal den være oliefri.

Forsyningsledningerne skal være polyethylenrør (PEM-rør) med tryktrin PN 10 (maks. 10 bar).

Diffusorerne kan være af forskellig type. Da det imidlertid gælder om at skabe mindst mulige bobler til fordeling over så stort et areal (volumen) som muligt, vil den mest hensigtsmæssige type være perforerede, armerede gummislanger med indre diameter på 10 mm. Diffusorslangerne er monteret på en manifold for enden af forsyningsledningen.

Der medgår 0,125 kWh (450 kJ) pr. normal m³ luft, der tilføres hypolimnion, svarende til 400.000 kWh/år ved udgangstryk på 8 bar. Ved et lavere udgangstryk på eksempelvis 7 bar vil energiforbruget være ca. 350.000 kWh, d.v.s. 50.000 kWh mindre.

Energiforbruget ved tilførsel af ilt ved brug af trykluft vil således være 0,35-0,4 kWh pr. kg. tilført ilt (*Atlas Copco pers. meddelelse*). Omkostningerne vil være mindst 0,50 kr./kg O₂, svarende til mindst 0,6 mio. kr./år inklusive vedligeholdelse af kompressor.

Overførslen af ilt til vandet under luftboblernes opstigning kræver en vis stighøjde eller rettere en vis kontakttid, for at ilten kan diffundere ud i vandet. En væsentlig faktor i den sammenhæng er boblestørrelsen. Jo større boblen er, jo længere er diffusionsvejen og opstigningshastigheden. Det gælder således om, at diffusoren skal producere så små bobler som muligt. Optimalt vil være bobler med diameter på ca. 0,3-0,7 mm. Bobler af denne størrelse kræver mindre end 15 m stighøjde for at opløses og afgive ilten til vandet

Det er beregnet, at der skal tilføres Furesøen 1000 tons ilt/år med en maksimaltilførsel på 10 tons ilt/dag. Beregning af antal kubikmeter atmosfærisk luft, der pr. år skal tilføres Furesøen for at tilføre denne iltmængde kan ske ved hjælp af *Tabel 3* og anvendelse af luftarternes tilstandsligning. Heraf fås, at der for at tilføre Furesøen ovennævnte iltmængde skal der tilføres 3,57 mio. Nm³ atm. luft pr. år. Denne mængde skal imidlertid tilføres over ca.150 dage svarende til gennemsnitligt 23.800 m³ atm. luft pr. dag. Forsyningsledningerne dimensioneres efter maksimaltilførsel (10 tons ilt/dag). I afsnit 3 er der redegjort for opdelingen af hypolimnion i 3 bassiner, hvilket betyder, at det vil være hensigtsmæssigt at udlægge 3 forsyningsledninger. Dette svarer til gennemsnitlig 12.000 m³ atm. luft pr. dag/diffusor eller 500 m³ atm. luft pr. time/diffusor.

Dimensionering af forsyningsledninger til diffusorerne skal endvidere tage hensyn til tryktab i:

- forsyningsledning
- diffusortilslutning
- ventil/flowmeter system
- tryktab på grund af vanddybde (hydrostatisk modtryk)

Der vil kræves fra Ø50 op til Ø75 mm ledninger for at fremføre de ønskede mængder luft.

Dimensioneringen af diffusorslangerne sker ud fra, at der skal tilstræbes bobler med diameter på ca. 0,3-0,7 mm. Ud fra totalvolumen på dybden af atmosfærisk luft pr. time, kendskabet til antal huller pr. m diffusorslange (1240 huller pr. m) samt boblernes opstigningshastighed skønnes der minimum krævet 6.000 m diffusorslange/diffusor.

Anlægsomkostningerne ved anvendelse af atmosfærisk luft ved en diffusor-kompressorløsning skønnes til minimum 3,5 mio. kr. De årlige driftsomkostninger og vedligeholdelse vil være minimum 1 mio. kr..

Ved passende dimensionering af diffusorer, forsyningsledninger og kompressor kan anlægget tilføre søen minimum 1.000 tons ilt pr. år og op til 10 tons/dag. Valg af hensigtsmæssig diffusorstørrelse og placering kan sikre, at ilten fordeles tilstrækkeligt i hypolimnion.

Det er diffusorerens størrelse, der ved en given lufttilførsel bestemmer påvirkningen af springlaget, idet den vertikale strømhastighed er afhængig af opstigningshastigheden af luftboblerne. Ved faldende boblestørrelse falder opstigningshastigheden. Ved brug af tilstrækkeligt store diffusorer vil der være tale om ringe påvirkning af springlaget.

Der vil være en væsentlig risiko for overmætning med kvælstof i hypolimnion. I forvejen er hypolimnion "belastet" af gasformig nitrogentilførsel ved denitrifikation, der tilfører vandet N_2 . Ved beluftningen vil der årligt blive tilført mere end 3.200 tons N_2 til hypolimnions 50 mio. m^3 vand. Dette svarer teoretisk til en koncentrationsforøgelse på 65 mg N_2/l eller en teoretisk overmætning på 500 %.

En del af overmætningen vil "aflastes" ved den vertikale vandstrøm i hypolimnion, der formidles ved beluftningen. Ved det faldende tryk i den opstigende vandstrøm frigøres overmættet kvælstof i bobler, der afgår til atmosfæren. Nitrogen er endnu mindre opløseligt i vand end ilt, ca. 30 % (Jensen, K. A., 1959). Tolerancen overfor gasovermætning hos akvatiske dyr, der bevæger sig meget i vertikal retning i søer, er muligvis ringe. Således opstår der akut "dykkersyge", hvis eksempelvis fisk udsættes for en nitrogenovermætning på 115 % (Poppe, T., 1999). Der opstår bobler af kvælstof i blodkar, væv og øjne. Tilstanden er kronisk og irreversibel, så fisken dør. Fra Hald Sø vides, at fiskene ynder at opholde sig i og lige over springlaget i varme somre. Der vil således være stor risiko for, at disse kan udsættes for gasovermætningen.

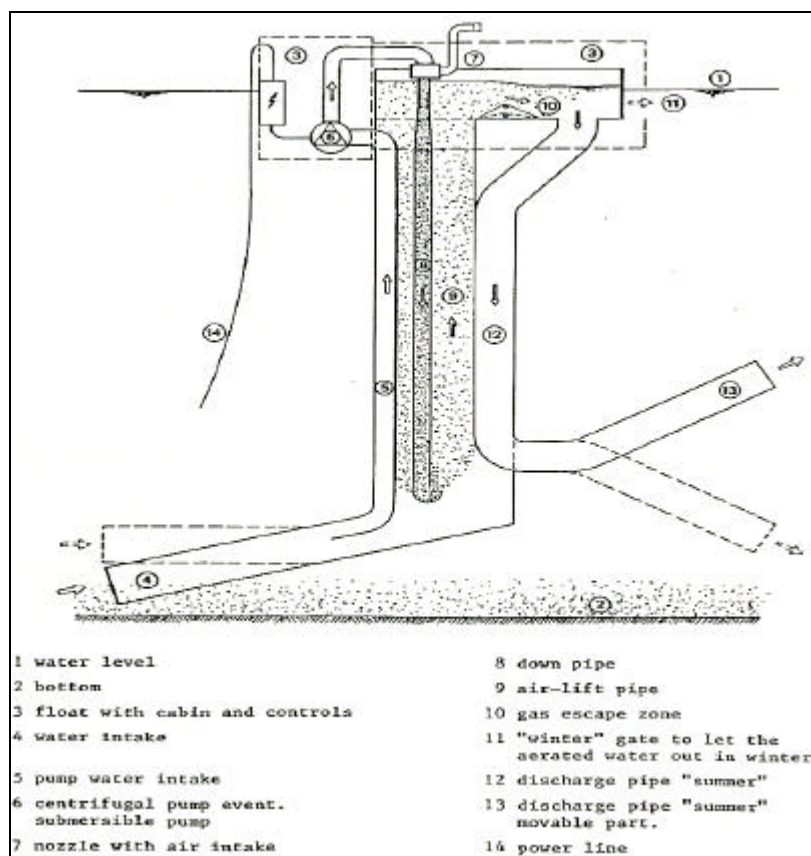
Anlægget skal være operationelt. Iltmængden til de enkelte diffusorer skal kunne reguleres fra 0 kg ilt/døgn til maksimum for den pågældende diffusor. Dette kan ske ved installation af flowmetre og ventiler. Systemets driftssikkerhed vil hovedsagelig være betinget af kompressorernes driftssikkerhed. Umiddelbart vurderes, at nedbrud af disse maksimalt vil betyde afbrydelse af

lufttilførsel i 1-2 dage. Levetid for kompressorer andrager for den pågældende størrelse 10-15 år.

Driften af et trykluftbaseret iltningsanlæg stiller krav om løsning af store tekniske problemer knyttet til støj og varmeafgivelse.

Det vil være muligt at anvende denne løsning uden, at der vil være synlig teknik på søen ud over den nødvendige minimums-markering med bøjer, der viser forsyningsledningernes og diffusorernes placering.

Samlet vurderet kan metoden imidlertid ikke anbefales på grund af risikoen for alvorlige skader på især fiskelivet som følge af gasovermætning med kvælstof. Endvidere indebærer metoden relativt høje anlægs- og driftsomkostninger

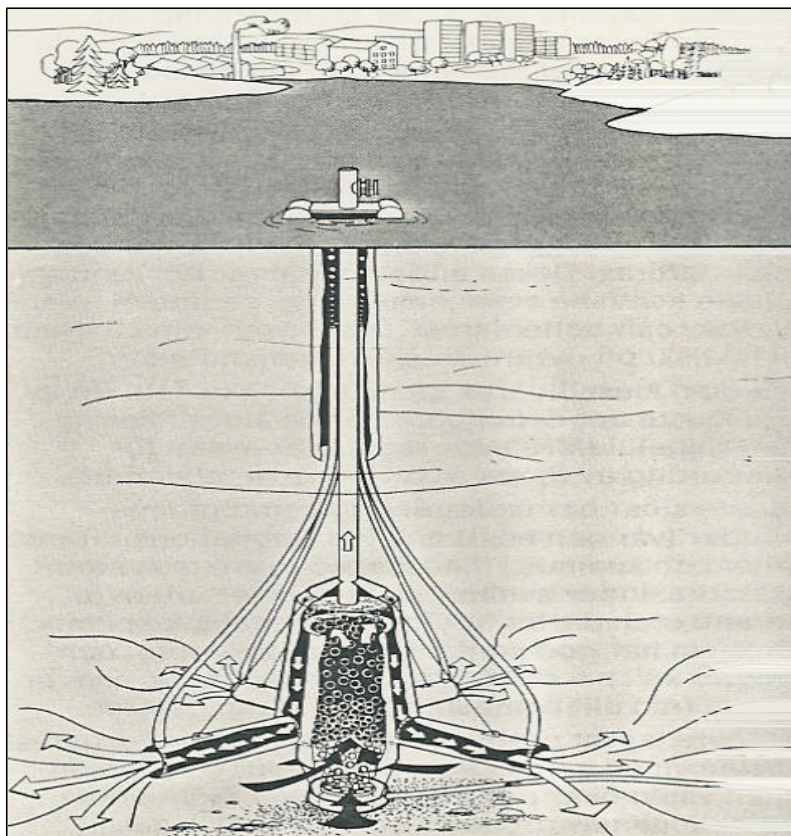


Figur 15. Lochers deep shaft metode

5.1.2.2 ”Deep shaft” og ”Mammutpumpe” systemer

Systemer, der anvender ”Deep shaft” og ”Mammutpumpe” princippet, findes i flere varianter. Der er én type kendetegnet ved anvendelse af pumpe, der gennem et rør gående fra hypolimnion til overfladen suger iltfattigt vand. Det iltfattige vand sendes retur til hypolimnion med stor hastighed under ind sugning af atmosfærisk luft. Når vandet når hypolimnion med et stort indhold af hvirvlende bobler, tvinges dette til et stigrør, der går fra bund til overflade. De store mængder luftbobler skaber en stor vertikal vandstrøm, der igen tvinges retur til hypolimnion. Den langvarige kontakt mellem bobler og de store vandmængder, der transporteres giver en god opløsning af atmosfærens gasser i søvandet. Der sker en opløsning af ikke alene ilt men også kvælstof.

Den horisontale fordeling af det beluftede vand sker ved vandstrømmen fra afgangsrøret, der kan skabe strømme i forskellige retninger. I *figur 15* er vist princippet i Locher & Cie SA's system, der har været anvendt flere steder i Alpelandene.



Figur 16. Atlas Copco's ”Limno” metode (Atlas Copco 1976).

En anden variant anvender udelukkende trykluft som drivkraft (Atlas Copco). I figur 16 er vist princippet i Atlas Copco's "Limno" metode.

Locher (1985) angiver en effektivitet på 0,8-3 kg ilt/kWh. Atlas Copco's *Limno aggregat* vil med et passende antal kunne tilføre den nødvendige iltmængde med samme effektivitet som ved kompressor-diffusorsystemet (0,35-0,40 kWh/kg tilført ilt).

Ud fra informationer fra Locher (1985) skal der ved Furesøen anvendes en effekt på ca. 2.000 kWh i døgnet for at tilføre søen den nødvendige iltmængde. Atlas Copco's system vil kræve samme størrelse kompressor som anført under kompressor-diffusor-systemet. Der er således ikke den store forskel i effektforbrug.

Der er ikke her gjort nærmere forsøg på dimensionere de 2 typer anvendelse ved Furesøen, da risikoen for uacceptabel overmætning med nitrogen er til stede også ved disse systemer, omend det vurderes, at den absolutte overmætning vil være mindre end ved kompressor-diffusor systemet.

Ud fra ovennævnte kan der ikke gives et præcist overslag over omkostninger ved denne løsning. Det vurderes dog, at der er tale om anlægsomkostninger på minimum 5-10 mio. kr. Umiddelbart vurderes det dog, at de begge vil være væsentlig dyrere end løsning med kompressor-diffusorsystemet, da der er tale om store fysiske aggregater placeret flydende eller nedsænket. Der vil være behov for forsyningsledninger af samme omfang som ved kompressor-diffusorsystemet.

5.2 *Tilførsel af ren ilt*

En af de væsentligste fordele ved opiltning af søvand med ren ilt i forhold til atmosfærisk luft, er at man kan tilføre fem gange så meget ilt pr. liter vand. Baggrunden er, at det er iltens partialtryk, der afgør hvor meget ilt, der kan opløses i vandet. Ved anvendelse af atmosfærisk luft kan der ved normal atmosfæretryk kun opløses godt 10 mg O₂/l (10 °C) jvf. tabel 2. Dette skyldes, at iltens partialtryk i atmosfærisk luft kun er 0,209 atm. (20,9 volumen %).

Ved anvendelse af ren ilt øges iltens partialtrykket til 1 atm., hvilket betyder, at iltmætningskoncentrationen øges med (1/0,209) * 10 mg O₂/l = ca. 50 mg O₂/l. Dette gælder ved overfladen, mætningskoncentrationen øges med dybden. Anvendelse af ren ilt bevirker således, at effektiviteten af et iltlingsaggregat øges med en faktor 5 sammenlignet med anvendelse af atmosfærisk luft.

Ren ilt kan fremskaffes på 2 måder:

- fremstilling på stedet
- leverance i flydende form.

For fuldstændighedens skyld skal der anføres, at ilt også kan leveres og anvendes i form af brintoverilte, H_2O_2 , der i vandig opløsning spaltes til vand og ilt. Denne løsning vurderes imidlertid ikke at være realistisk.

Fremstilling af ilt på stedet – oxygen-generator

Fremstilling af ilt på stedet sker ved anvendelse af iltgenerator, der frafiltrerer ilt fra atmosfærens luft. Iltgeneratorer anvendes en del indenfor medicin, hvor små generatorer forsyner patienter med dårlig lungefunktion med ilt. I industrien f.eks. indenfor akvakultur anvendes iltgeneratorer, hvor der i visse egne ikke er mulighed for transport af ilt på flydende form eller som gas i trykflasker.

Der findes flere typer af iltgeneratorer med lidt forskellig teknik. Princippet i en af de hyppigst anvendte er en tryk-vacuum-adsorptionsproces. Adsorptionsprocessen er knyttet til mineralet *zeolit*. Zeolit er et silikat ($n(SiO_2)$) med en fast opbygget gitterstruktur, der skaber et enormt netværk af porer og kanaler med adsorptive og ionbytende egenskaber. Zeolitens poresystem virker som en *molekylsi*, der er i stand til at filtrere molekyler afhængig af molekylstørrelse, en teknik, der har været kendt i en lang årrække (Read and Watson, 1962).

Ved højt tryk adsorberes nitrogen af molekylsien, der igen frigøres ved lavt tryk. Ved denne proces filtreres iltens molekyler fra. Generatoren er opbygget af 2 tanke, hvor atmosfærisk luft under et tryk på 3-6 bar presses gennem den første tank, hvor zeoliten optager nitrogen. Den fraseparerede ilt ledes til en tryktank. Herfra kan ilten ved hjælp af kompressor føres ud til iltningssaggetat.

Zeoliten mættes og processen fortsættes i tank 2. Tank 1's zeolit regenereres ved returnering til atmosfæretryk og "returskylning" med en mindre mængde ilt. Efter regenerering er tank 1 klar til brug igen. Hele systemet er automatiseret og drives af elektricitet. Zeolitens evne til at virke som *molekylærsi* nedbrydes kun langsomt og materialet skal kun skiftes med års mellemrum.

Et tryk-vakuums-adsorptionsanlæg kan producere et "iltprodukt" med et kvælstofindhold på kun 5-10 %. Effektiviteten udtrykt i kWh/kg O_2 er 1 kWh/kg O_2 . Pris pr. kg O_2 er således mindst 1 kr.

+ 5 øre pr. kg i serviceomkostninger. Anlægsinvesteringen beløber sig til godt 5 mio. kr. (*Oxymat A/S, J. Sjögren pers. meddelelse*).

Der vil være risiko for kvælstofovermætning, som ved brug af atmosfærisk luft.

Leverance af ilt fra fabrik

Den mest udbredte iltforsyning er leverance fra fabrik. Her fremstilles ilten ved destillation af flydende luft. Den producerede ilt leveres på flydende, fortættet form, d.v.s. nedkølet til $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ilten er her en lyseblå væske. Leverancen sker i højisolerede tanke og ledes på forbrugsstedet over i en isoleret opbevaringstank (*kryotank*), hvorfra den kan anvendes efter fordampning.

Ilt i flydende form vurderes i den ønskede årlige mængde at koste kr. 1,10 pr. kg.

Det vurderes, at ilt leveret i flydende form er at foretrække frem for ilt produceret på stedet ved anvendelse af iltgenerator, både på grund af arealbehovet til iltgeneratoren og af økonomiske grunde.

Tilførsel af ilt i form af ren ilt til Furesøens hypolimnion kan ske ved anvendelse af flere metoder. En del af disse ligner meget dem, der er gennemgået under metoder til lufttilførsel.

5.2.1 Indpumpningsystem og opiltning på land

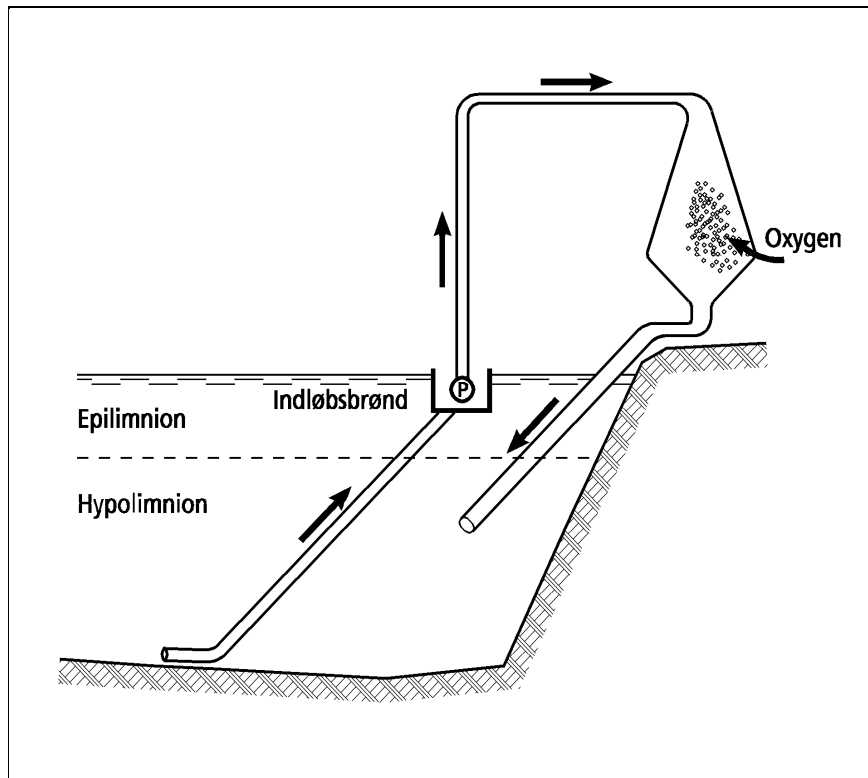
Anvendelse af et indpumpningssystem med opiltning på land er en teknik, der anvendes meget i akvakultur. I modsætning til anvendelse af atmosfærisk luft er det uhensigtsmæssigt at anvende diffusorer i iltningebassiner på land. I stedet vil man anvende "deep shaft" systemet, iltacceleratorer (søjlereaktorer) eller iltkegler.

I opbygning svarer disse systemer til det, der er beskrevet i afsnit 5.1.1 Det består af indløbsledninger af passende dimension, der fører hypolimnisk vand frem til en pumpebrønd ved søbredden. I pumpebrønden er der placeret en lavtryks- eller højtrykspumpe, der pumper vandet gennem "deep shaft" systemet, iltaccelerator eller iltkegle .

I "deep shaft" systemet pumpes vandet fra indløbsbrønden ned i et underjordisk U-formet rørsystem lig metoden med atmosfærisk luft. "Deep shaft" U-røret skal gå ca. 40 m ned i jorden. Ilten ledes

ind ved indløbssiden. Under nedtransporten vil iltboblerne søge mod strømmen, men vil i den stigende trykgradient mod U-rørets bund opløses og skabe en overmætning på 300-400 % svarende til 30-40 mg O₂/l.

I iltaccelerator og -kegle systemerne pumpes vandet ind øverst i en cylindrisk eller kegleformet beholder og ledes ud i bunden. Der doseres ren ilt i bunden af beholderen. Ilten søger opad i den nedgående vandstrøm. I iltacceleratoren er der øverst et medium af små plastlegemer med en stor overflade. Vandet findeles i dråber, der falder ned gennem en iltmættet atmosfære, førend det ledes ud i hypolimnion. Under gennemløbet af acceleratoren overmættes vandet til en mætningsprocent på 2-300 %, svarende til en udløbskoncentration af ilt på 20-30 mg O₂/l. I iltkeglen pumpes vandet op under højere tryk i reglen af en centrifugalpumpe og ledes gennem den vandfyldte iltkegle (figur 17). Ilttilførslen i bunden medfører en modstrøms opstigning af iltbobler, der på grund af udvidelsen af iltkeglen står som en sky midt i denne, indtil de enkelte bobler er opløst. Vandet kan her opnå mætningsprocenter på 300-450 %, svarende til 30-45 mg O₂/l.

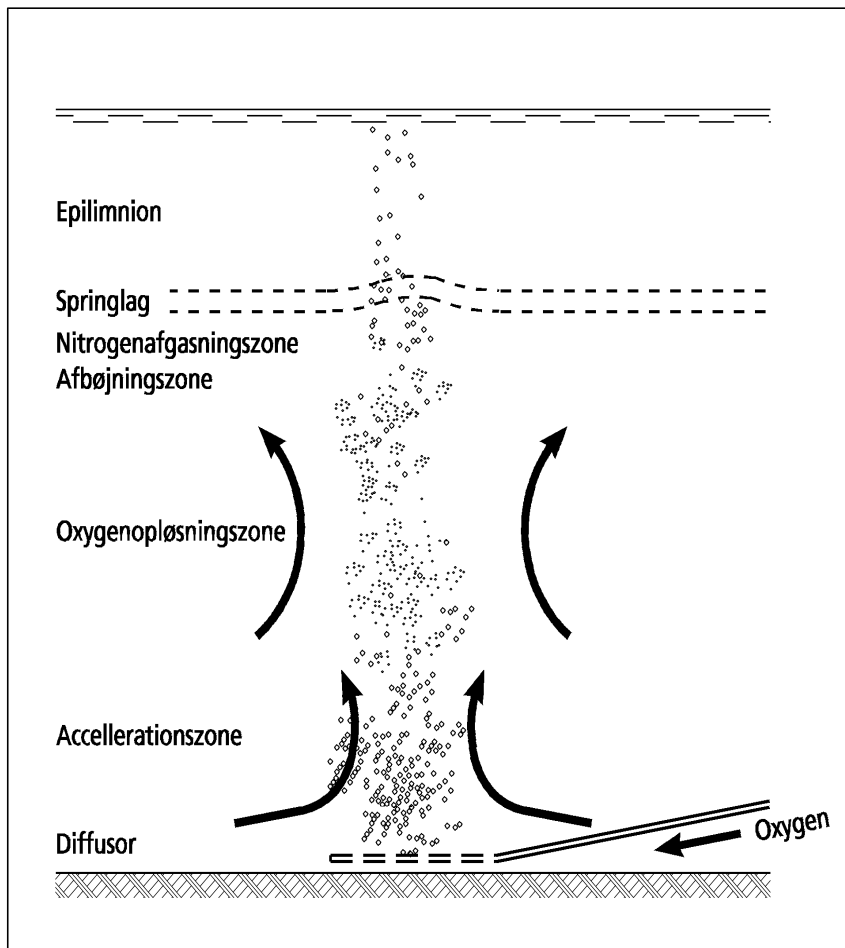


Figur 17. Indpumpning af hypolimnisk vand og iltning i kegle.

Tilførslen af ilt ved hjælp af disse systemer sikrer en effektiv berigelse af det indpumpede hypolimniske vand med ilt. Der kan med et passende vandflow og en passende ilttilførsel opnås en overmætning på op til 200-450 % svarende til et indhold på 20-45 mg O₂/l.

En tilførsel på 1.000 tons ilt pr år og op til 10 tons pr. dag kræver en indpumpning af vand på ca. 3 m³/sec.

På grund af de store vandmængder, der skal pumpes er driftsomkostningerne meget store. Det vurderes, at indpumpnings-opiltningsmetoden kun er relevant, hvis man samtidig foretager kemisk fældning af fosfor i det indpumpede vand, en løsning der blev overvejet ved Hald Sø.



Figur 18. Illustration af de fysiske processer, der skabes af diffusorerne

5.2.2 *Iltning i søen*

Den tekniske opbygning af et diffusorsystem forsynet med ilt fra land er opbygget som det tilsvarende gennemgået under afsnittet med atmosfærisk luft.

Det består af en forsyningsstation på land enten i form af en oxygen-generator eller en kryotank.

Ilten ledes ud til diffusorerne i forsyningsledninger af PEM-rør af passende dimension.

Diffusorerne udlægges i de dybeste afsnit af hypolimnion.

Forsyningsledninger kan være forsynet med ballast af jern- eller betonklodser eller påmonterede stålwirer. En bedre løsning er at nedspule eller nedpløje PEM-rørene, da de så ikke vil være til gene for biomanipulationsprojektet eller de rekreative aktiviteter.

Ilttilførslen reguleres via et ventil flowmeter system.

Ved ilttilførslen udledes ilten i fine bobler fra de perforerede diffusorslanger. Fordelingen af ilt i hypolimnion sker ikke blot ved simpel diffusion under boblernes opstigning i hypolimnion. I *figur 18* er vist mere detaljeret de fysiske processer, der skabes af diffusorsystemet.

Der opstår ved iltboblernes opdrift en vertikal vandstrøm. Vandstrømmens hastighed og vandføring afhænger af 2 faktorer:

- Iltboblernes størrelse
- Diffusorslangernes længde.

Iltboblernes opstigningshastighed øges med stigende boblestørrelse. Den optimale boblestørrelse for de dybdeforhold, der er i hypolimnion i Furesøen, er bobler med diameter på 0,3-0,7 mm. Opstigningshastigheden for boblerne vil være 5-15 cm/sec. Vandets strømhastighed i den påvirkede vertikale opstigningszone vil være næsten lige så stor. Tværsnitsarealet af vandstrømmen pr. længdeenhed af diffusorslange er vanskelig definerbar. For en diffusorstørrelse på 1000 m skønnes flowet at være i størrelsesordenen 15-25 m³/sec. Hastighedsprofilen vil være en klokkeformet fordelingsfunktion, hvor toppunkt er umiddelbart i boblefanen.

5.3 *Vægtning af løsninger på ilttilførsel til hypolimnion i Furesøen*

I afsnit 4 er gennemgået en række krav, der må stilles til et iltningssystem ved Furesøen. Der er krav af teknisk, miljømæssig og økonomisk art. I *Bilag 1* er opstillet en vægtning af en række af de ovennævnte muligheder.

Af vægtningen af de forskellige løsninger fremgår, at en løsning med tilførsel af ren ilt fra fabrik og iltning i søen ved diffusorer vil være at foretrække. Dette skyldes, at dette system ud fra en samlet vurdering er den mest fordelagtige løsning og lever op til alle kravene, der skal stilles til anlægget:

- anlægget skal kunne tilføre søen minimum 1000 tons ilt pr. år og op til 10 tons/dag,
 - iltten skal i videst muligt omfang fordeles ligeligt i hypolimnion,
 - springlaget skal forstyrres mindst muligt, således at temperaturen i hypolimnion forbliver lav (8-10 °C),
 - ingen skader på fisk p.g.a. overmætning med kvælstof,
 - anlægget skal være operationelt og driftssikkert,
 - anlægget skal være let at vedligeholde,
 - anlægget skal være let at fjerne,
 - anlæggets placering og drift må ikke give anledning til miljømæssige gener i form af støj og lugt,
 - påvirkningen af de visuelle forhold fra anlæg på land og i søen skal minimeres,
 - lille krav til areal til landanlæg,
 - lave anlægs- og driftomkostninger.
-

6. ILTNINGSSYSTEM VED FURESØEN

6.1 *Anlæg på land*

Forskellige muligheder for placering af iltlingsanlægget på land er undersøgt i samarbejde med Skov- og Naturstyrelsen. Den mest optimale placering af landanlægget er på Stavnsholt Renseanlæg, der i dag administreres af Hofmann-Krüger konsortiet. Renseanlægget modtager spildevand fra store dele af Farum.

Renseanlægget administreres på vegne af Finansieringsinstituttet for Industri og Handel (FIH), der ejer anlægget frem til år 2018.

Forslag til placering af anlægget fremgår af *Bilag 2*. Ved placeringen af anlægget på Stavnsholt Rensningsanlæg er der ingen problemer med indpasningen af anlægget i forhold til omgivelserne. Placeringen giver også størst muligt hensyn til sikkerhed, adgangsforhold og visuelle forhold.

Der har været kontakt til Hofmann-Krüger konsortiet og Farum Kommune med henblik på afklaring af hvilke krav, der stilles, hvis landanlægget placeres på renseanlægget. Det har ikke været muligt at få en endelig tilkendegivelse fra konsortiet, idet det kan - i forbindelse med verserende sag om udledningen fra Stavnsholt Renseanlæg - blive nødvendigt at etablere en pumpestation på samme/næsten samme lokalitet som landanlægget. Bortset fra dette forbehold vil arealet blive frit stillet til rådighed for amterne.

6.2 *Kryoanlæg*

Ilten leveres på flydende form nedkølet til under kogepunktet (under $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$) til landanlægget. Ilten opbevares i et *kryoanlæg*, hvilket er et tankanlæg for flydende gasser. Ilten tilføres Furesøen gennem en fordamper og forskellige trykregulatorer, idet ilten gennem fordamperen overgår til gasform, og der sker en betydelig trykstigning.

Et kryoanlæg består af :

- Adgangsvej for tankvogne, der leverer ilt
 - Tankgård med aflåst indhegning
 - Kryobeholder med armaturer til påfyldning, sikkerhed og drift
 - Afgangsfordampere
-

- Trykopbyggere, der sikrer det nødvendige tryk
- Ventiler og flowmetre
- Tankovervågning
- Sikkerhedsudstyr

I *Bilag 3* er vist indretning af kryoanlægget, der skal anvendes ved opbevaring og tilførsel af ilt til Furesøen.

Tankgården

Tankgården skal udformes som vist på *Bilag 3*. Placeringen skal opfylde sikkerhedskravene i DS 111 "Centralanlæg for gasser", 1. udgave fra 1996.

Sikkerhedskrav vedr. afstande er defineret i DS 111 pkt. 3.3.3.2 :

- 15 meter fra brandfarlige bygninger og oplag
- 8 meter fra andre bygninger
- 8 meter fra naboskel
- 8 meter fra offentlig vej
- 6 meter fra kloakker
- 6 meter fra brønde, kælderskakte mv.
- 1 meter fra BS60-bygningsskel uden åbninger inden for 8 m
- 15 meter fra påfyldnings- og udluftningsstudse for tanke med olie o.lign

Afstandskravene er defineret ud fra tankens ydre begrænsning.

Kryobeholderen skal være en HCC 50000 oxygentank med specifikationer som angivet i *Tabel 5*. Tanken er en nedliggende type og placeres på betonpladen som vist i *Bilag 3*.

Tankbenævnelse:	HCC 50000
Nettoindhold:	47.500 l (54.200 kg)
Fordampningskapacitet:	1.300 kg/time
Længde:	11,5 m
Diameter:	3 m
Højde:	3,5 m
Bruttovægt:	80.200 kg
Egenvægt:	26.000 kg

Tabel 5. Specifikationer for kryotank

Afgangsfordampere

Før udledning på gasform til hypolimnion gennem forsyningsledningerne ledes ilt i flydende form igennem en afgangsfordamper. Her fordamper den flydende ilt, idet den opvarmes af den omgivende atmosfæriske luft.

Ved tanken er placeret 2 fordampere, hver med en fordampningskapacitet på 650 kg O₂/time. En enkelt fordamper dækker således rigeligt det maksimale behov (417 kg O₂/time). Det er således muligt ved maksimal udledning at foretage daglige omskiftninger mellem de 2 afgangsfordampere, der ved udledning af ilt iser til ved kondensering af den atmosfæriske lufts vandindhold. Det tager mindre end et døgn, før den lukkede fordamper er optøet ved normal sommertemperatur.

Trykopbygger

Trykopbyggeren er en mindre fordamper, der sikrer det nødvendige driftstryk i tankanlægget. Ved fald i trykket i toppen af kryotanken, åbner en trykopbyggerventil, så der ledes flydende ilt til trykop-byggerfordamperen. Den gasformige ilt føres til toppen af kryo-tanken, hvor der opbygges tryk. Når det normale driftstryk nås, lukker trykopbyggerventilen.

Driftstrykket i kryotanken på 10 bar kan aflæses på et manometer placeret forrest på tanken, hvor man også kan aflæse det øjeblikkelige iltindhold.

Reguleringsudstyr

Reguleringen af ilttilførselen sker ved:

- Reduktionsventil
- Flowmetre.

Reduktionsventilen indstilles på 8 bar.

I et skab placeres 3 flowmetre, der giver driftspersonellet mulighed for at regulere ilttilførslen til de 3 forsyningsledninger fra 0 kg O₂/time til maksimum for den enkelte forsyningsledning.

Tankovervågning

Kryoanlægget forsynes med en enhed, der sikrer konstant monitoring af flow for de enkelte ledninger samt iltbeholdning. Enheden er via modem tilkoblet pc'er hos iltleverandøren, Frederiksborg Amt og Københavns Amt.

Sikkerhed

Kryotanken er sikret af flere sikkerhedsaggregater. Det drejer sig om en sikkerhedsventil på beholderen, der åbner ved forhøjet tryk (17 bar). Ved endnu højere tryk (21 bar) er der en sprængplade, der sikrer, at trykket udlignes. På fordelingsrørene i kryoanlægget er der sikkerhedsventiler, der åbner ved uacceptabelt højt tryk (24 bar).

6.3 Forsyningsledninger

Iltten føres gennem 3 stk. Ø40 mm (PEM-rør, PN10) fra tankgårdens reguleringskab frem til en Ø2 m brønd nedgravet ved søbredden neden for Stavnsholt Rensningsanlæg. Rørene trækkes i Ø160 mm PVC-rør (kloakrør) nedgravet til frostfri dybde. Det sikres ved udluftningsrør, at PVC-røret er velventileret. I brønden afsluttes PEM-røret med stopventil.

Ledninger til transmission af ilt fra brønden til diffusorerne er ligeledes PEM-rør, PN 10. Dimensionerne for de forskellige afsnit af forsyningsnettet til søens diffusorer er fastsat efter de enkelte diffusorers maksimale iltledning og tryktabet. Sidstnævnte afhænger især af forsyningsledningens længde og vanddybden, på hvilken diffusoren er placeret. Hertil kommer et mindre tab i ventiler samt ved diffusorerens åbningstryk, der er bestemt til 0,2 bar.

I *Bilag 4* er detaljeret gennemgået beregningsmetodik for dimensionering af forsyningsledningerne.

Ledning nr.	1	2	3
Maks. iltbehov (kg O ₂ /døgn) ¹⁾	2.130	3.450	4.420
Maks. iltbehov (Nm ³ O ₂ /døgn) ²⁾	1.490	2.413	3.091
Diffusordybde (m)	32	37	28
Længde forsyningsledning (m) ³⁾	1.288	1.335	2.155
Udvendig diameter (mm)	32	32	40
Længde diffusorer (m)	1000	1600	2100

¹⁾Jvf. tabel 2; ²⁾ 0 °C, 1 bar; ³⁾ Fra fordelingsbrønd v. søbredden

Tabel 6. Dimensioner for de 3 forsyningsledninger til fremføring af ren ilt samt længde af diffusorer

Der skal udlægges 3 forsyningsledninger med dimensioner som angivet i *Tabel 6*.

Af hensyn til sikringen af forsyningsledningerne er det valgt, at disse ledninger pløjes/spules ned til 0,5-1,0 meter under eksisterende søbund af hensyn til risiko for beskadigelser ved opankring.

Det sikres afhængig af bundens beskaffenhed ved passende ballastering, at der ikke kan ske opstigning af forsyningsledningerne.

I *Bilag 5* er vist tracéerne for forsyningsledningerne på et dybdekort.

Ved forsyningsledningernes rørende i hypolimnion placeres en betonforankring på 150 kg, som forsyningsledningen er ført igennem. Forsyningsledningen afsluttes med en fritliggende rørstrækning på 50 m ballasteret med påmonteret stålkabel.

Det frie PEM-rørstykke er for enden forsynet med en manifold af PEM-rør af samme dimension som forsyningsledningen. Manifoldudtag er T-stykker med udtag, der tillader tilkobling af diffusorslange (Ø10 indvendig og Ø16 udvendig).

6.4 Diffusorer

Hypolimnion opdeles af de undersøiske højderygge og grunde i 3 hovedbassiner som vist i *figur 12* (side 24). I *tabel 2* (side 25) er vist de morfometriske data for hvert bassin opgjort ud fra estimater fra det udarbejdede dybdekort over søen.

Diffusorerens antal, længde (*Tabel 6*) og placering er afstemt efter ovennævnte morfometriske data. På dybdekortet i *Bilag 5* er vist tracéerne for diffusorslangerne. De første 50 m af diffusorslangerne er uperforeret 16 mm trykslange af hensyn til finindstilling af ilttildelingen til den enkelte diffusorslange. Diffusorslangerne er 16 mm armeret gummislange. Langs diffusorslangen er 4 rækker perforeringer. Der er i alt 1240 perforeringer pr. løbende m diffusorslange. Perforeringerne åbner ved et iltryk på 0,2 bar ved vandoverfladen. For hver 10 m vandsøjle kræves yderligere 1 bar i iltryk, for at perforeringerne åbner. De angivne længder på diffusorslangerne sikrer en boblediameter på 0,2-0,8 mm.

Ved udlægning af diffusorerne finindstilles ilt doseringen til de enkelte diffusorafsniit ved op- eller neddrøsling ved hjælp af ventil på manifolden. Kontrol af passende ilttilførsel til de enkelte diffusorer sker samtidig fra båd med ekkolod. For at nå ud til de

østligste dele af bassin 3 er der indskudt 300 m 16 mm trykslange mellem manifolden og den dertil hørende diffusorlange.

Anlæggets diffusorer vil være velegnet substrat for aerobe bakterier, der udnytter vandets organiske stof og ilttilførslen til øget produktion. Dette giver sig udslag i bevoksninger af bakterier på diffusorerne. Rengøringen af diffusorerne sker i forbindelse med optagning af fordelingsystemet under vinterklargøringen. Rengøringen af fordelingsystemet kan ske effektivt på ophalerflåden ved et automatisk børstesystem, der fjerner bakteriefilmen fra slangernes overflade under ophalingen (*Bilag 6*).

For at forhindre opstigning af diffusorerne skal der monteres ballast for hver 2 m slange. Diffusorlangen har en diameter på 16 mm, hvilket giver en opdrift på 201 g/m. Egenvægten er 200 g/m.

Ballasten kan hensigtsmæssig være ståklodser, der monteres med en 0,5 m snor på slangen. Herved sikres, at diffusorlangen kommer til at svæve ca. 0,5 m over sedimentfladen. Den endelige dimensionering af ballastering udføres af entreprenør.

6.5 Afmærkning

Da forsyningsledningerne er nedgravede, er det kun nødvendigt at afmærke følgende:

- begyndelse og afslutning af den frie del af forsyningsledning med manifold
- afslutning af diffusor.

Afmærkningen foretages med hvide fenderbøjer med 40 kg betonballast. De hvide fenderbøjer er mindst skæmmende.

6.6 Udlægnings- og ophalingsudstyr

En afgørende del af ilttingsprojektet er udlægnings- og ophalingsudstyr. På tegningen i *Bilag 6* er angivet arbejdsflådens dimensioner, opbygning og tekniske udstyr til udlægning og ophaling af forsyningsledninger og diffusorer. I *Bilag 7* er givet en nærmere beskrivelse.

Arbejdsflåden skal betjenes af 2-3 mand. Manøvreringen af flåden sker ved hjælp af en trækbaad. Båden er udstyret med minimum 80 hk. påhængsmotor. Båden skal af hensyn til manøvreedygtighed være af "Dory"-typen og være forsynet med navigationsudstyr som GPS og ekkolod.

Arbejdsflåden kan nyttiggøres ved evt. sideløbende biomani-
pulation, da designet bl. a. er baseret på udvikling til brug ved bio-
manipulation.

6.7 *Tilladelser til etablering af iltningsanlægget*

Iltningsprojektet kræver tilladelse efter Lov om Naturbeskyttelse.
Denne tilladelse skal gives af Frederiksborg Amtsråd og Køben-
havns Amtsråd. Der må påregnes at medgå 3 måneder med
sagsbehandling og efterfølgende offentliggørelse.

Detailprojektet indeholder de nødvendige oplysninger, der
afdækker de påvirkninger, som projektet vil have på natur og
miljø, så der kan fremsendes fyldestgørende ansøgning om
tilladelse til etablering og drift af iltningsanlægget.

7. STYRING OG KONTROL AF ILTTILFØRSELEN

7.1 Styring af ilttilførselen

Regulering af ilttilførselen til de enkelte forsyningsledninger med diffusorer sker ved regulering af flowet på flowmeterventilerne som beskrevet på side 48. Flowmetrene er kalibreret af iltleverandøren, så man umiddelbart kan bestemme, hvor mange kg ilt, der skal udledes pr. time.

I afsnit 3 er beregnet iltbehovet for de sidste 6 år. Det fremgår, at variationen er ret stor. Det vil derfor være hensigtsmæssigt, at ilttilførselen styres efter profilmålingerne, der som beskrevet nedenfor foreslås gennemført som led i kontrol af iltning-indgrebet.

7.2 Kontrol af den miljømæssige effekt af ilttilførselen

Det nationale program for overvågning af vandmiljøet 1998-2003 "NOVA 2003" (Miljø- og Energiministeriet Miljøstyrelsen 1998) gennemføres af de 2 amter for Furesøen. Dette program bør udbygges med et program, der fokuserer på følgende:

- iltindhold og -fordeling i hypolimnion
- iltningens indvirkning på ammoniak-, nitrat-, jern- og fosforomsætning i hypolimnion
- sedimentets indhold af fosfor, jern og organisk stof
- udviklingen i bestanden af larver af dansemyggen *Chironomus anthracinus*
- udviklingen i forekomsten af reliktkrebsene i hypolimnion.

Temperatur-, iltindhold og -fordeling i hypolimnion

NOVA 2003 tilsynene udvides med en kortlægning af temperatur og iltindhold og -fordeling i vertikal og horisontal retning i de 3 afsnit af hypolimnion. Dette kan eksempelvis gøres ved transekter udlagt tværs over disse. Der gennemføres eksempelvis profilmåling af ilt og temperatur langs transekterne med målepunkter over dybderne (37), 35, 30, 25, 20 og 15 m. Det vurderes efter de indledende målinger, om det er nødvendigt med 2 transekter pr. bassin (nord-sydgående og øst-vestgående).

Iltningens indvirkning på ammoniak-, nitrat-, jern- og fosforomsætning i hypolimnion

Det vurderes, at NOVA 2003 programmet er tilstrækkeligt til at belyse, hvilken indflydelse iltningen har på hypolimnions omsætning af ammoniak, nitrat, jern og fosfor.

Sedimentets indhold af fosfor, jern og organisk stof

NOVA 2003 programmet for sedimentundersøgelser bør gennemføres hvert tredje år for at kunne beskrive ændringer i indhold af fosfor, jern og organisk stof.

Udviklingen i bestanden af larver af dansemyggen *Chironomus anthracinus*

Det er velkendt, at *Chironomus anthracinus* spiller en stor rolle for omsætningen af det organiske stof i sedimentoverfladen i hypolimnion (Sand-Jensen, K og C. Lindegaard, 1996). Artens udbredelse og forekomst vil samtidig være en god indikator for indvirkningen af iltningen (Hamburger, K. et al., 1995). Der foreslås hvert år en månedlig prøvetagning af forekomsten af *Chironomus anthracinus* med Ekmann-bundhenter langs 1 transekt i hvert bassin i perioden april-november. Prøvetagningen foreslås på samme dybde som prøvestationerne til profilmålinger. Der udtages 5 prøver pr. station og sigtning gennem 200 µm sigte, hvilket vil sikre resultater, der kan beskrive den tidsmæssige variation i artens bestandsudvikling (Lindegaard, C. et al. 1993).

Udviklingen i forekomsten af reliktkrebsene i hypolimnion

De 2 overlevende arter af reliktkrebs må forventes at få udvidet leverummet i Furesøen ved ilttilførslen. Der foreslås således gennemført en specialundersøgelse af disse arter hvert andet år.

8. TIDSHORISONT FOR RE-STAURERING AF FURESØEN

Bag de fleste sørestaureringsprojekter har der ligget en hypotese om, at søerne efter gennemførelsen af et restaureringsindgreb kunne "klare sig selv". Imidlertid er der en lang række eksempler på, at indgrebene har måtte gentages efter en årrække eller fortsættes i en længere periode end forudsat. Dette har også været tilfældet med tilførsel af ilt til Hald Sø. Prognoserne var i begyndelsen, at iltningen kunne ophøre efter 10 år. Forsøgene med nedtrapningen af ilttilførselen har imidlertid vist, at der kræves godt 100 tons ilt pr. år for at fastholde den positive udvikling. En lavere tilførsel medfører, at der sker en stigning i frigørelsen af fosfor fra bunden.

Viborg Amtsråds Udvalg for Miljø og Teknik har besluttet at fortsætte iltningen, da den årlige udgift på kr. 160.000 betragtes som en driftsudgift på linie med drift af rensningsanlæg, pleje af naturarealer m.v..

I forprojektet (Københavns Amt, 1999) er det vurderet, at ilttilførselen til Furesøen kan aftrappes over 10 år. Erfaringerne fra Hald Sø tyder imidlertid på, at der kan være behov for en vis ilttilførsel efter, at de 10 år er gået. Det er vigtigt ved en sådan vurdering stadig at inddrage den eksterne belastning med fosfor. For både Furesøens og Hald Sø's vedkommende er der stadig en væsentlig tilførsel af fosfor. Sammenlignes de eksisterende belastningsdata for kvælstof og fosfor fås:

Furesø: N: 4,9 g/m² pr år
P: 0,2 g/m² pr år

Hald Sø: N: 45,0 g/m² pr år
P: 0,7 g/m² pr år.

Umiddelbart synes tallene at pege på en bedre udgangssituation for Furesøen, også selv om vurderingen kompliceres af, at vandets opholdstid er ca. 7-10 gange så stor i Furesøen (10-15 år) som i Hald Sø (1,3-1,5 år).

De grundlæggende mekanismer bag effekten af ilttilførsel til hypolimnion er beskrevet i afsnit 2. I korte træk sker der det, at ilttilførselen til hypolimnion reducerer den interne fosforbelastning. Herved er der i det efterfølgende år en mindre pulje af uorganisk fosfor til rådighed for forårets og sommerens algeproduktion. Den formindskede algeproduktion medfører efter-

År	Alternativ 1	Alternativ 2
1	1.000	800
2	917	733
3	833	667
4	750	600
5	667	533
6	583	467
7	500	400
8	417	333
9	333	267
10	250	200
I alt	6.250	5.000

Tabel 7. Den sandsynlige udvikling i iltbehov ved Furesøen ved 2 alternative udgangspunkter

følgende en formindskelse af iltforbruget i hypolimnion ved sedimentationen af dødt plankton. Processen har således en selvforstærkende effekt.

I afsnit 3.2 er redegjort for beregning af Furesøens iltbehov. Af COWI er anslået et behov på 1.000 tons ilt pr. år (Københavns Amt, 1999). Beregninger for perioden 1995-2000 viste et behov på gennemsnitligt 800 tons ilt pr. år.

Det kan antages, at iltbehovet i Furesøen muligvis vil aftage efter et lignende mønster, som det er set i Hald Sø. Med udgangspunkt i et behov på 1.000 tons ilt pr. år vil der 10 år efter igangsættelse af iltning af Furesøen skulle tilføres ca. 250 tons ilt/år (*Tabel 7*). Anvendes en lineær nedtrapping fås en samlet tilførsel af ilt til Furesøen i perioden år 1 til år 10 på ca. 6.250 tons ilt.

Viser behovet sig kun at være 800 tons ilt pr. år det første år, vil behovet efter 10 år være ca. 200 tons ilt pr. år. Eller en samlet 10-års tilførsel på 5.000 tons ilt.

9. ØKONOMI

9.1 Etablerings- og driftsomkostninger

Omkostninger til etablering af iltningsanlæg ved Furesøen kan anslås til følgende:

Pkt.	Aktivitet	Udgift
1	Anstillingsplads mv. (10 %)	kr. 290.000
2	Etablering af bundplade, og indhegning af tankgård	kr. 100.000
3	Forsyningsledninger, land, inkl. foringsrør	kr. 80.000
4	Fordelingsbrønd, 2,0 meter	kr. 30.000
5	Forsyningsledninger, sø, nedspulet/-pløjet i søbund	kr. 1.000.000
6	Diffusor, inkl. ballast samt udlægning 1. gang	kr. 280.000
7	Udlægnings- og ophalerflåde	kr. 950.000
8	Trækbåd	kr. 300.000
9	Projektering og tilsyn (15 %)	kr. 430.000
10	Uforudseelige udgifter (10 %)	kr. 290.000
	Samlet sum	kr. 3.750.000

De anførte %-satser referer til summen af anlægsudgifter (de øvrige faste udgifter). Overslaget er udarbejdet i prisniveau januar 2001.

Ovenstående overslag er ekskl. moms, og baseret på erfaringspriser fra de enkelte elementer, som anlægget består af. Hvor der ikke har været erfaringspriser, er der indhentet supplerende prisoplysninger fra leverandører og producenter.

Det er forudsat, at arealet ved Stavnsholt Renseanlæg stilles omkostningsfrit til rådighed for projektet.

I forhold til det tilsvarende anlægsoverslag fra forprojektet (Københavns Amt. 1999) er der tale om væsentlige justeringer på følgende områder:

- Flåder, merpris 1,05 mio. kr., idet der tilsyneladende ikke tidligere var forudsat levering af ny, special-designet flåde
- Tankgård, forsyningsledninger og diffusorer, merpris 0,78 mio. kr., idet der tilsyneladende ikke tidligere var forudsat, at forsyningsledninger på søbunden skulle nedgraves eller -spules.

Omkostninger til drift af iltanlægget ved Furesøen kan for de første 10 år anslås til følgende:

Drift	År efter start af ilttilførsel										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	I alt 10 år
Leje af forsyningsanlæg	153	156	160	163	166	169	173	176	180	184	1.680
Leje af overvågningsanlæg	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	100
Oxygen	1100	1008	917	825	733	641	550	458	367	275	6.875
Diffusorlanger renovering					200						200
Moniteringsprogram	500	500	300	300	200	200	200	200	200	200	2.800
Uforudsete udgifter	176	167	139	130	111	102	93	84	76	67	1.145
Drift i alt	1939	1841	1526	1428	1220	1122	1026	928	833	736	12.800

Beløb i kr. 1000

I forhold til driftsoverslaget fra forprojektet er det særligt monitoringsudgifterne, der er forøget. Det drejer sig især om supplerende biologiske undersøgelser.

Den samlede driftsudgift over 10 år skønnes således til kr. 12,8 mio..

9.2 *Opdeling i entrepriser*

Udførelse af iltanlæg og den løbende ilttilførsel til tankanlægget foreslås udbudt i 2 selvstændige entrepriser, idet der ikke umiddelbart er en sammenhæng mellem levering af ilt hhv. udførelse af anlægsarbejderne hverken arbejdsmæssigt eller tidsmæssigt. Anlægsarbejdet udføres en gang for alle, mens iltleverancen strækker sig over mange år.

Der foreslås følgende indhold i de to entrepriser:

- E01 Anlægsentreprise (entreprisenum ca. 3,3 mio. kr.)
 - Etablering af bundplade for tankgård og indhegning
 - Etablering af forsyningsledninger fra regulerings- skab på land til manifold i vand
 - Levering af udlægnings- og ophalerflåde for diffu- sorledninger
 - Etablering af manifold (fordelingsledning) for enden af forsyningsledninger
 - Etablering af diffusorledning

- E02 Tankanlæg og iltleverance (entreprisenum ca. 7,14 mio. kr.)
 - Etablering af tankgård, inkl. tank, fordamper og reguleringsskab.
 - Levering af ilt i en periode efter etablering af tankgården, f.eks. 10 år

Entreprise E02 kan evt. udbydes med en længere iltleverings- periode.

For eksakt vurdering af entreprisernes endelige placering under de respektive udbudsdirektiver fra EU anbefales det, at amternes juridiske afdeling konsulteres (hhv. Tjenesteydelsesdirektivet 92/50/EØF og Bygge- og anlægsdirektivet 93/37/EØF).

Da der søges støtte fra EU foreslås det dog, at begge entrepriser udbydes i begrænset udbud efter prækvalifikation.

Herved sikres det, at det kun er firmaer, der kan leve op til de overordnede krav, der kan få lov til at byde ind på opgaverne.

10. TIDSPLAN

Tidsplanen for etablering og ibrugtagning af iltningsanlægget fremgår af *Bilag 8*.

11. INFORMATION

I dette afsnit beskrives en række mulige tiltag med henblik på at informere om restaureringen af Furesøen.

Målgruppen for information vedrørende projektet vil være meget bred. Primært skal lokale borgere, interesse- og brugergrupper af søen have let adgang til information vedrørende projektets indhold, betydning, status og resultater. Sekundært bør beskrivelse og information vedrørende projektet kunne dække undervisningsbehov.

Erfaringerne fra Hald Sø viser at et omfattende, teknisk projekt som iltning af Furesø endvidere vil være omfattet af national og international interesse.

En informationsstrategi kan gennemføres som en fælles indsats for biomanipulationsprojektet og iltningsprojektet og indeholde følgende elementer:

- 1) Information til lokale borgere og brugergrupper.
 - 2) Foldere/plancher/kortborde
 - 3) Informationstavler
 - 4) Udstilling på naturskolen ved Furesøbad.
 - 5) Information ved f.eks. Statsskovdistriktets naturvejleder og Amternes medarbejdere i.f.m. ture langs og på søen.
 - 6) Pressemeddelelse/pressemøder
 - 7) Hjemmeside
 - 8) Video/TV
-

Ad. 1: Information til lokale borgere og brugergrupper

Før projektets anlægsfase er det vigtigt, at lokale borgere og brugergrupper informeres om, hvorledes projektet planlægges gennemført, hvad forventningerne er til forbedringer af søens miljøtilstand, samt hvorledes projektet i driftsfasen kan forventes at påvirke brugere og rekreative interesser.

En liste over organiserede brugere fremgår af *Bilag 9*.

Lokale borgere og brugergrupper kan inviteres til orienteringsmøder. Brugergrupper holdes orienteret ved kopier af pressemeddelelser. Endvidere vurderes en evt. hjemmeside være et velegnet informationsforum for lokale borgere og organiserede brugere.

Ad. 2: Foldere/plancher/kortborde

I projektets planlægningsfase, forud for anlægsfasen, udarbejdes en folder, der beskriver projektets formål, indhold og gennemførelse. Folderen kan rekvireres hos amterne og forefindes på lokaliteter, hvor lokale borgere, interesse- og brugergrupper færdes. Endvidere opstilles kortborde med indhold som i folderen på befærdede steder rundt om søen.

Folder og kortborde opdateres i henhold til projektets status og resultater.

Ad. 3: Udstilling

Før projektets anlægsfase foreslås det, at der opstilles en udstilling med udgangspunkt i illustrerede plancher, fotostater og evt. en interaktiv PC-informationskiosk,

Informationskiosken er et interaktivt medie, hvor der eksempelvis kan skabes forståelse for søens miljøtilstand og restaureringsprojektet ud fra en sømodel. Ved at ændre på fysiske/kemiske/biologiske parametre vises resultatet umiddelbart grafisk i ændringer af de koblede fysiske/kemiske/biologiske parametre og ledsages af videosekvenser af det tilhørende dyre- og planteliv. Andre interaktive flader kan være udviklingen af søens miljøtilstand, historie, kulturelle påvirkning m.v. Informationskiosken kan også være tilgængelig via hjemmesiden.

En udstillingen på naturskolen ved Furesøbad kan omfatte en beskrivelse af søens biologi, lagdeling, iltsvind i bundvandet, fosforens rolle for søens miljøtilstand, sedimentets rolle i søens fosforomsætning, projektets formål og forventede effekt, den tekniske opbygning (med eksempler på anvendte materialer), baggrunden for anvendelse af ren ilt.

Ad. 4: Naturvejlederture

Ved Hald Sø har der været stor interesse for de naturture som Statsskovdistriktets naturvejleder og Amtets medarbejdere har afholdt. Der er blevet afholdt ca. 10 velbesøgte ture årligt. Lignende ture foreslås afholdt i.f.m. de to Furesø-restaureringsprojekter.

Ad. 5: Pressemeddelelse/pressemøder

Pressemeddelelse/pressemøder kan afholdes i.f.m. begivenheder (f.eks. opsætning af kryotank, opfyldning af kryotank, optagning af udstyr).

Ad. 6: Hjemmeside.

En hjemmeside vil være en velegnet middel til at give den almene offentlighed og søens organiserede brugere adgang til en omfattende og ajourført information. En hjemmeside kan samle al relevant information om projektet og dets fremdrift, således at der er tale om en dynamisk hjemmeside, der holdes opdateret med information, efterhånden som den skabes.

Det er en erfaring fra Hald Sø projektet, at der vil være interesse for projektet fra videnskabelige institutioner, herunder udenlandske. Hjemmesiden kan foruden et populærvidenskabeligt niveau have et teknisk betonet niveau til brug for teknikere nationalt som internationalt, med en engelsk brugerflade.

Hjemmesiden foreslås opbygget med en geografisk grænseflade (geografisk interface med GIS funktionalitet, dvs. zoom, panorering og identifikation af elementer på kortet) – suppleret med menuer, opdelt efter emner.

Hjemmesiden kan indeholde følgende menuer:

- Om Furesøen:
 - Målsætning og tilstand
 - Interesser knyttet til Furesøen og dens omgivelser (regionplanens udpegninger)
 - Adgang til data fra søovervågningen
 - Mulighed for at plote tidsmæssige udviklinger
 - Mulighed for at udskrive data.

 - Præsentation af projekterne:
 - Biomanipulation
 - Projektbeskrivelse
 - Status for opfiskning
 - Fotos der illustrerer fremdrift og status for projektet
 - Iltningsprojektet
 - Projektbeskrivelse
-

- Status for iltprojektet
- Fotos der illustrerer fremdrift og status for projektet

- Information til brugerne
 - Nyheder
 - Ændringer i anvendelsen af området til rekreative formål
 - Spørgsmål/svar

- Dokumentation
 - Myndigheder og finansiering
 - Amterne og deres rolle
 - Skov- og Naturstyrelsen
 - EU

Ad. 8: Video/TV

Det foreslås, at der fra projektets begyndelse til der er opnået resultater, optages video af såvel teknisk som kulturel, natur- og miljømæssig karakter.

På baggrund heraf kan der under projektets forløb udarbejdes to teknisk betonedede videoer til information for teknikere/politikere.

I samarbejde med TV-stationer kan der på baggrund af de foreliggende videooptagelser redigeres nyhedsindslag til udsendelse på lokal og nationalt TV.

Endvidere kan der udarbejdes en informationsvideo med bred information om projektets indhold (baggrund, formål, teknisk indretning, anlægsarbejde, miljøundersøgelser, dyre- og plantelivet i søen, rekreativ udnyttelse m.v. samt amternes og EU's rolle). En version af informationsvideoen kan udarbejdes med henblik på afsættelse til national/international TV.

REFERENCER

Atlas Copco (1976). *Limno Sjörestaureringsaggregat*. Informationsmateriale.

Hamburger, K., P. C. Dall & C. Lindegaard (1995). Effects of deficiency on survival and glycogen content of *Chironomus anthracinus* (Diptera, Chironomidae) under laboratory and field conditions. *Hydrobiologia* **297**: 187-200. 1995.

Københavns Amt. 1999. Restaurering af Furesø. Forprojekt. Cowi.

Jensen, K.A. (1959). Almen Kemi 1 og 2. Gjellerups Forlag.

Københavns Amt (1993). Overvågning af søer 1992. Miljøserie nr. 50.

Københavns Amt (1994). Overvågning af søer 1993. Miljøserie nr. 57.

Lindegaard, C., P. C. Dall and S. B. Hansen (1993). Natural and imposed variability in the profundal fauna of Lake Esrom, Denmark. Verh. Internat. Verein. Limnol. 25, 576-581. Stuttgart, September 1993.

Locher & Cie AG (1985). The deep shaft re-oxygenation process in the service of lake rehabilitation. Informationsmateriale.

Miljø- og Energiministeriet Miljøstyrelsen (1998). Nationalt pro-gram for overvågning af vandmiljøet 1998-2003 "NOVA 2003"

Monkhouse, F. J. and H. R. Wilkinson (1969). Maps and Diagrams. University Paperbacks

Poppe, T. (1999). Fiskehelse og Fiskesygdommer. Universitetsforlaget.

Read, H. H. and J. Watson (1962). Introduction to Geology. Macmillan.

Sand-Jensen, K. og C. Lindegaard (1996). Økologi søer og vandløb. Gads Forlag.

BILAG

Bilag 1: Vægtning af løsningsmuligheder for ilttilførsel til Furesø

Bilag 2: Oversigtsplan tankgård og tracé

Bilag 3: Indretning tankgård

Bilag 4: Dimensionering af forsyningsledninger

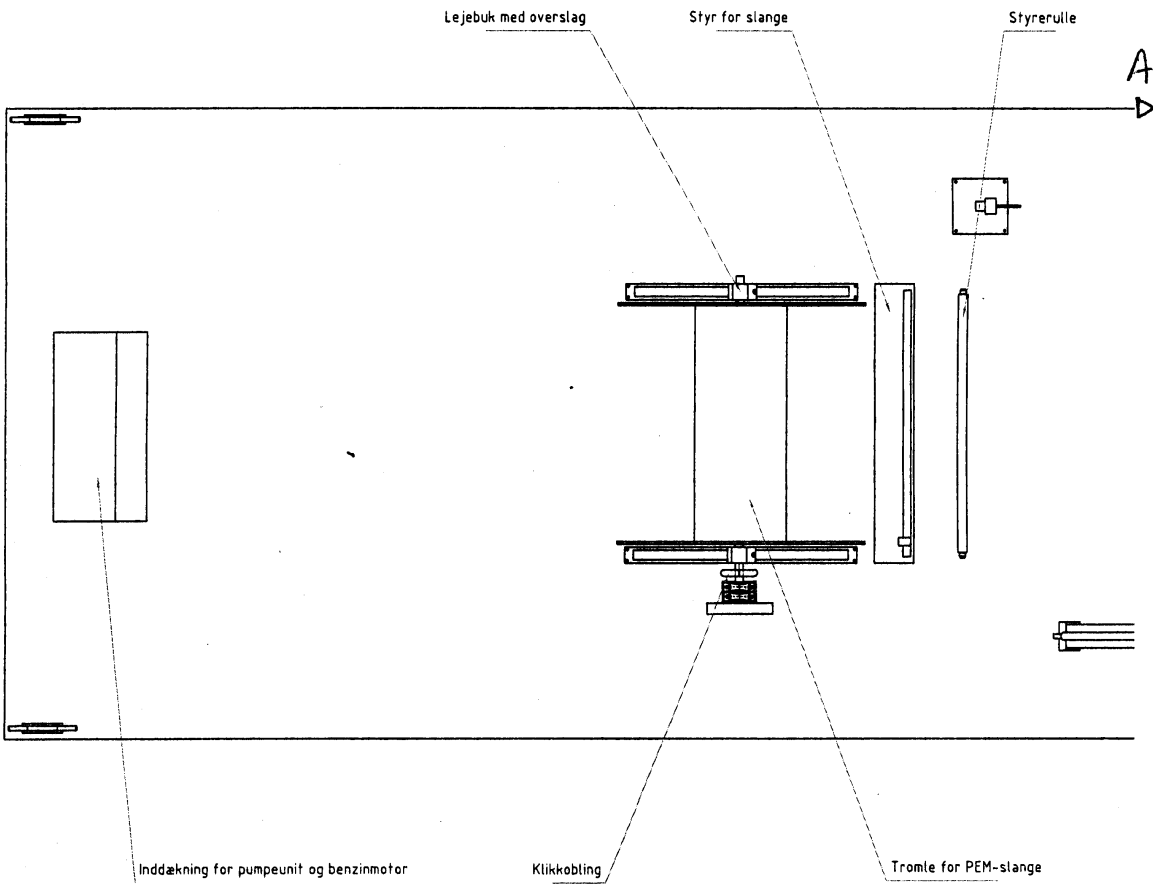
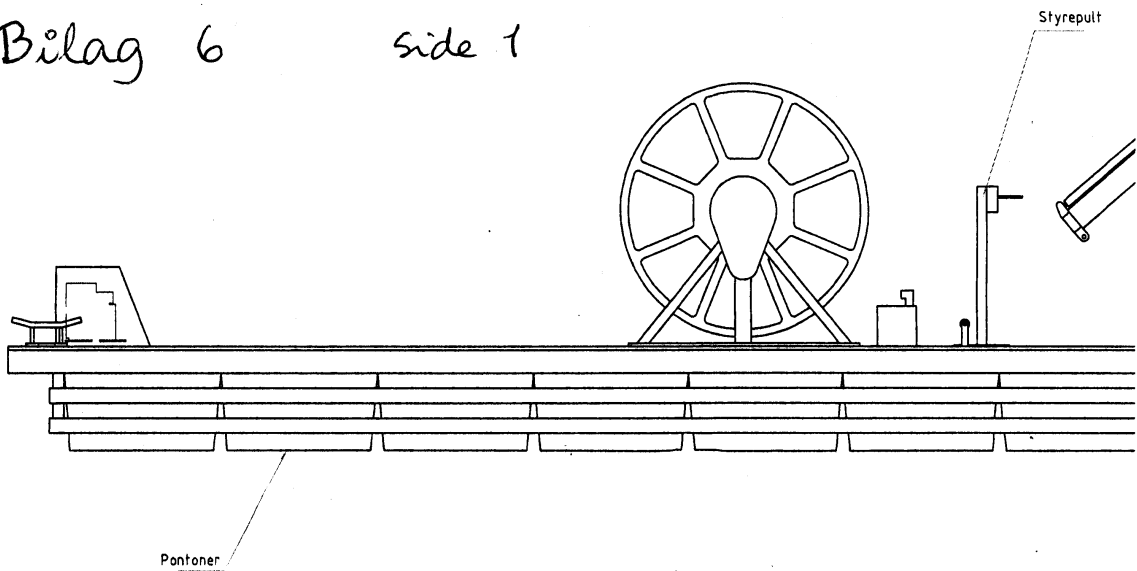
Bilag 5: Oversigtsplan forsyningsledninger og diffusorer

Bilag 6: Indretning af udlægnings- og ophalingsflåde

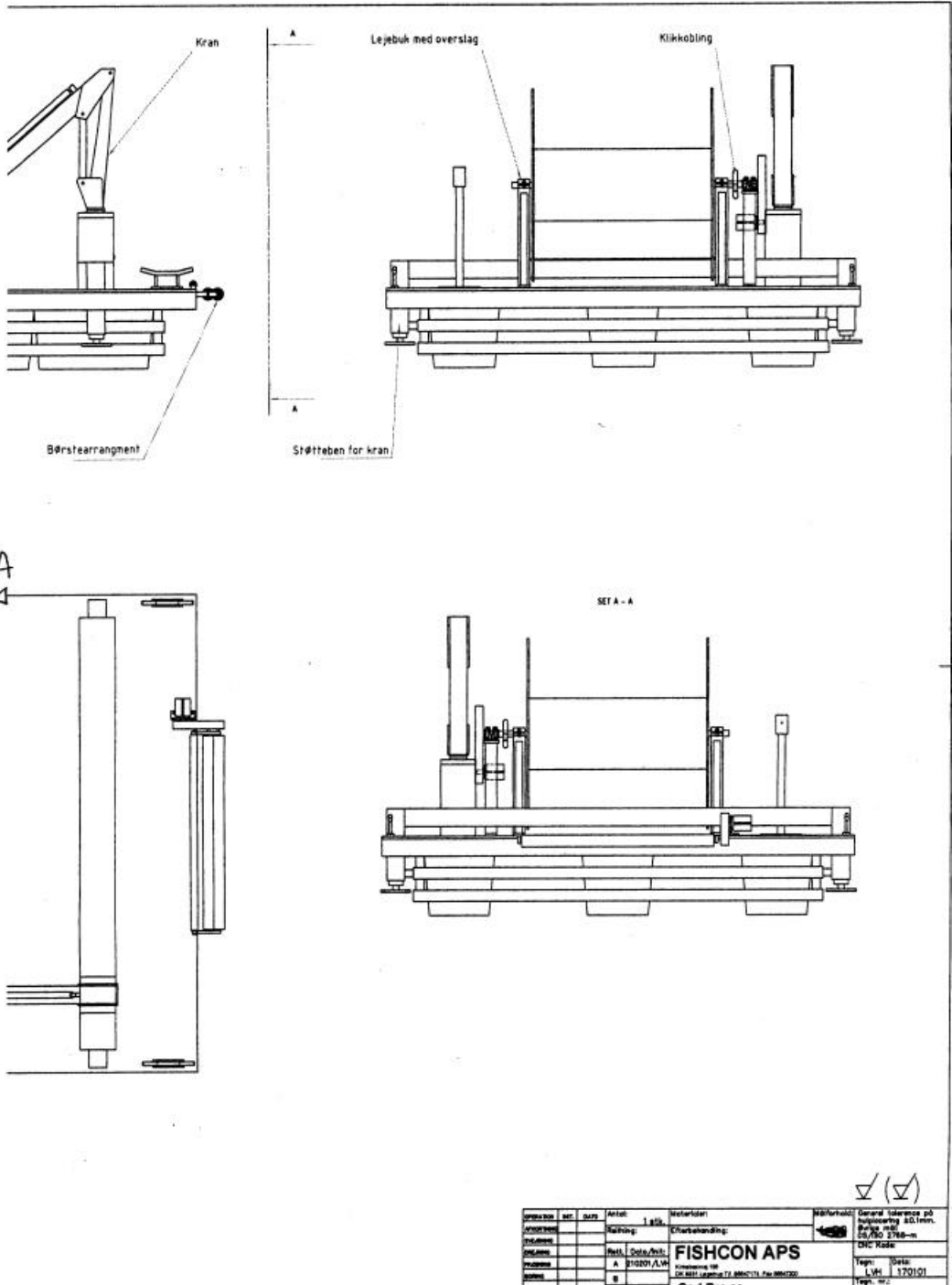
Bilag 7: Beskrivelse af udlægnings- og ophalingsflåde

Bilag 8: Tidsplan

Bilag 9: Rekreativ anvendelse - kontaktpersoner



Bilag 6 side 2



Udgivelsesnr.	1	Udgivelsesdato	1. 2006	Revisjon	1	Revisjonsdato	1. 2006	Godkendt af	[Signature]	Generel tolerances på huller og søjler 0,1mm. Bore og 0,15-0,2mm 0,2-0,3mm
Udgivelsesnr.		Udgivelsesdato		Revisjon		Revisjonsdato		Godkendt af		DNC Kilde
Udgivelsesnr.		Udgivelsesdato		Revisjon		Revisjonsdato		Godkendt af		Uge: 170101
Udgivelsesnr.		Udgivelsesdato		Revisjon		Revisjonsdato		Godkendt af		Uge: 170101
Udgivelsesnr.		Udgivelsesdato		Revisjon		Revisjonsdato		Godkendt af		Uge: 170101

Flåde til udlægning og ophaling af forsyningsledninger, og diffusorslanger

Flådens anvendelse

Arbejdsflåden skal bruges ved udlægning og optagning af PEM-rør Ø32 og Ø40 mm og Ø16 mm diffusorslange. PEM-rørene skal transportere ilt fra landanlægget til diffusorer placeret i søen.

Rør og slanger føres under optagning gennem et børsteaggregat, der fjerner belægninger af bakterier. Der er i alt 3 stk. forsyningsledninger med længde varierende fra ca. 1.300 m til ca. 2.150 m. For hver forsyningsledning fremstilles der en tromle for PEM-rør. Arbejdet på flåden udføres typisk af 2-3 personer. Flåden og dens udstyr skal konstrueres og fremstilles i henhold til gældende dansk lov. Ligeledes skal udstyret fremstilles og overfladebehandles efter gældende normer for funktion i ferskvand af normal dansk sammensætning.

Godkendelser

Det er et krav, at den endelige konstruktion er analyseret af en anerkendt skibskonsulent, hvad angår opbygning, konstruktionsbelastninger og den fysiske placering af de enkelte komponenter.

Flåden skal i sin konstruktion efterfølgende være godkendt til sit formål af Søfartsstyrelsen. Dette sker på basis af beregninger udført af skibskonsulenten, m.h.t. stabilitet, bæreevne og konstruktion m.v.. Indeholdt i godkendelsen fra Søfartsstyrelsen vil der ligeledes være et krav til sikkerhedsudstyr

Den endelige udformning af flåden skal aftales med Københavns Amt og Frederiksborg Amt.

Flådens opbygning

Arbejdsflåden består af følgende komponenter:

1. 1 stk. flåde
2. 1 stk. børsteaggregat
3. 1 stk. kran
4. 1 stk. styr til udrulning og -oprulning af PEM-rør og slange

5. 1 stk. spil for PEM-rør incl. tromler
6. 1 stk. hydraulikanlæg
7. 1 stk. styrepult
8. Diverse styreruller
9. Spil til optagning af ankre.

Komponent 1: Flåde

Flåden skal i princippet opbygges som en flydebro med pontoner. Flåden manøvreres med en båd af *Dory*-type udstyret med minimum 80 Hk motor. Båden er forsynet med trækblok, der tillader præcis manøvrering. De fysiske mål for flåden, bæreevne samt konstruktion m.v. vil være givet ud fra ovennævnte beregninger. Flådens dæk beklædes med aludørkplader. Som minimum forsynes flåden med 4 stk. fortøjningsbeslag, 1 stk. placeret i hvert hjørne svarende til Søfartsstyrelsens godkendelse.

Komponent 2: Børsteaggregat

Der skal forrest på flåden i niveau med vandoverfladen monteres et børsteaggregat, der består af 2 stk. børster, der roterer ved hjælp af en hydraulikmotor. Børsternes længde skal være af en størrelse, der dækker PEM-rørets tværbevægelse under oprulning, som er ca. 1700 mm. Børsternes diameter og beskaffenhed skal være sådan at bakterie- og slambelæggninger fjernes fra rør. Børstearrangementet benyttes kun ved optagning af rør og diffusorslange.

Komponent 3: Kran

På flåden monteres en hydraulisk kran. Kranen placeres, så den ikke er til gene for rør og slange under udlægning og optagning. Kranarrangementet er forsynet med to stk. hydrauliske støtteben, som drejes ned mod søbunden, når kranen er i brug. Kranen skal benyttes, når flåden lægger til ved søbredden. Inden udlægning benyttes kranen til at tage fyldte tromler med rør fra land og til at placere tromlerne i spillet for rør på flåden. Efter endt udlægning af et sejles flåden til land, hvor den tomme tromle byttes ud med en fyldt tromle.

Inden optagning benyttes kranen til at tage tomme tromler fra land og til at placere tromlerne i spillet for PEM-rør på flåden. Efter endt optagning af et sæt tromler benyttes kranen til at ombytte den fyldte tromle fra flåden med en tom tromle fra land. Kranen betjenes via styrepulten.

Komponent 4: Styr til udlægning og –optagning af PEM-rør

Umiddelbart før tromlen er der monteret et styr til rørdlægning og -optagning, der sikrer, at PEM-røret ligger rigtigt på tromlen, samt der er plads til det nødvendige antal meter rør. For hver omgang tromlen roterer, flytter styret sig, hvad der svarer til diameteren på røret.

Komponent 5: Spil til udlægning og –optagning af PEM-rør

Spillet til udlægning og –optagning af PEM-rør skal opbygges som 1 stk. lejebuk med løse tromler, i alt 3 stk. svarende til antallet af iltledninger. På lejebukken er der monteret en lejeskål med overslag. Overslaget sikrer, at tromlen er holdt på plads under h.h.v. udlægning og optagning, samt at tromlen nemt og hurtigt kan udskiftes. Overslaget låses efter quicktool princippet. Spillet er drevet via en hydraulikmotor. Mellem tromle og transmission er der monteret en ”klikkobling” der gør det muligt at udskifte tromlerne nemt og hurtigt. Omdrejningstallet justeres manuelt via en ventil på styrepulten, så hastigheden for h.h.v. udlægning og optagning passer til operatøren. Tromlerne konstrueres således, at der er plads til 2.200 m. Ø40 mm PEM-slange. Af hensyn til dimensioneringen af kranen og flåden laves tromlerne så lette som muligt.

Komponent 6: Hydraulikanlæg

Hydraulikanlægget skal bestå af en pumpeunit, der drives af en benzinmotor, oliemotorer for spil og børstearrangement samt det nødvendige udstyr for forsyning og betjening af alle hydrauliske komponenter, bl.a. rørledninger, slangeforbindelser, fittings, reguleringer, betjeningsventiler m.v.. Pumpeunit og benzinmotor placeres i en aflåseligt inddækning.

Komponent 7: Styrepult

Fra styrepulten skal det være muligt at betjene samtlige komponenter samt regulere rørspillets omdrejningstal. Styrepulten placeres hensigtsmæssigt på flåden.

Komponent 8: Styreruller

Diverse styreruller: På flådens dørk monteres det nødvendige antal styreruller, som sikrer rør en uhindret vej fra tromle til vand og retur.

Komponent 8: Spil til optagning af ankre

Der skal monteres et spil til optagning af ankre. Dette spil kan enten være i tilknytning til komponent 5 eller som en selvstændig enhed.