

## Forord

I det danske samfund er der en bred enighed om, at energieffektivisering er et vigtigt instrument i forhold til reduktion af den globale opvarmning. Således har både Folketinget og siden EU opstillet skrappe krav til Danmark reduktion af drivhusgasser og hermed også til reduktion i energiforbruget. Med de ambitiøse mål for reduktion i det nationale energiforbrug er innovation, forskning og udvikling af ny effektiv teknologi og proces væsentlig. Det er nødvendigt forsat at styrke indsatsen for energiforskning i Danmark. Vi har med samarbejdet omkring energieffektive dambrug vist, at en branche kan nå langt i bestræbelserne på at energieffektivisere processerne, især hvis det tænkes ind i designet. Med implementering af projektets resultater vil akvakulturen kunne løfte sig op i superligaen, hvad energieffektivitet angår, og dermed blive et flot forgang billede for mange andre brancher.

Jeg vil gerne takke de deltagende dambrug, Teknologisk Institut og ikke mindst Dansk Akvakultur for et eksemplarisk samarbejde.

2008-12-19

Peter Weldingh  
Lokalenergi

Danmark har et stort potentiale i opdræt af fisk. EU har således en strategi om, at bæredygtig akvakultur skal øge produktionen med 4 % om året. Herhjemme udgør fiskeopdræt allerede over 20 % af den samlede produktion af spisefisk til de danske forbrugere, og det indgår i den danske regerings handlingsplan for udvikling af fiskeri og akvakultur, at produktion i akvakultur skal tredobles. Danmark har også en veludviklet branche for teknologi og know-how vedrørende recirkulering, vandrensning og komplette opdrætsanlæg. Hertil kommer, at Fødevarerministeriet bidrager til udviklingen med støtte til opførelse af mere miljøvenlige anlæg, forarbejdning, afsætning og forskning.

Vi har således en stærk platform for vækst. Væksten skal bl.a. realiseres gennem indførelse af mere moderne og mere miljøvenlig teknologi. For dambrugenes vedkommende er der investeret kraftigt i de såkaldte modeldambrug, som har et reduceret vandforbrug og relativt mindre udledning. Recirkulering kræver imidlertid energi. Vi kan se fra Regnskabsstatistikken for 2006, at for de klassiske dambrug udgør omkostninger til el ca. 4,7 % af de samlede omkostninger, for de recirkulerede anlæg er tallet 6,9 %. Vi imødeser en stigende fokus på bæredygtighed, og heri indgår bl.a. sektorens carbon footprint.

Det er derfor afgørende, at vores anlæg designs og drives, så vi får flest mulige fisk per kWh vi bruger. Det kræver viden og målrettet forskning, og dette projekt udgør et væsentligt bidrag til den proces.

2008-12-19

Brian Thomsen  
Dansk Akvakultur

# 1 Indholdsfortegnelse

1	Indholdsfortegnelse .....	4
2	Indledning .....	7
2.1	Baggrund .....	7
2.2	Problemformulering og fokus i projektet .....	7
2.2.1	Problemformulering .....	7
2.3	Deltagere .....	8
3	Beskrivelse af dambrug og erhverv .....	9
3.1	Ferskvandsdambrug .....	9
3.1.1	Produktionsudvidelser på traditionelle dambrug .....	9
3.1.2	Modeldambrug .....	9
3.2	Miljøkrav og regulering af ferskvandsdambrug .....	9
3.2.3	Lovgrundlag for regulering ferskvandsdambrug .....	9
3.2.4	Modeldambrugsbekendtgørelsen .....	10
3.2.5	Foderkoefficient og produktionsbidrag: .....	10
3.3	Åleopdræt .....	11
3.3.6	Miljøkrav ved åleopdræt .....	11
3.3.7	God vandkvalitet og opdrætsforhold generelt .....	11
3.4	Fiskene forsyningsbehov .....	12
3.4.8	Ilt .....	12
3.4.9	Foder .....	12
3.5	Fiskenes produktion af affaldsstoffer .....	12
3.5.10	CO <sub>2</sub> Kultveilte .....	12
3.5.11	NH <sub>4</sub> Ammonium .....	13
3.5.12	Suspenderede stoffer (organisk materiale) .....	13
3.6	Opbygning af opdrætsanlæg .....	13
3.6.13	Det ”traditionelle” dambrug .....	13
3.7	Modeldambrug .....	15
3.7.14	Mikrosigter .....	15
3.7.15	Biofiltre .....	16
3.7.16	Design filosofier .....	18
3.7.17	Modeldambrug type 1 .....	18
3.7.18	Modeldambrug type 3 .....	20
3.8	Åleanlæg .....	22
4	Iltning- og afgangning i dambrug .....	24
4.1	Iltforbrug i dambrug .....	24
4.1.1	Vandets iltindhold .....	24
4.1.2	Iltforbrug fisk .....	25
4.1.3	Design parametre .....	25
4.1.4	Biofilter .....	25
4.1.5	Dækning af fiskenes iltbehov .....	26
4.1.6	Tilgængeligt iltindhold i vand .....	26
4.2	CO <sub>2</sub> ; .....	27
4.2.7	Bicarbonat system .....	27
4.3	Kvælstof: .....	28

---

5	Teoretisk beskrivelse af de anvendte principper for beluftning .....	29
5.1.2	Opsummering.....	30
5.1.3	Teori om boblestørrelse og –opstigningshastighed.....	30
6	Anvendte teknologier og principper til iltning / beluftning.....	34
6.1	Overfladebeluftere (Hjulpiskere) .....	34
6.2	Rislefilter.....	34
6.3	Beluftning med luft under tryk.....	35
6.3.1	Blæsertyper .....	35
6.3.2	Lavtryksdiffusorer.....	35
6.3.3	Kummebeluftere.....	36
6.3.4	Mammutpumpe / Airlift.....	37
6.4	Teori.....	38
6.4.5	Ren ilt.....	39
6.4.6	Iltkegler .....	40
6.4.7	ReOx .....	41
6.4.8	U rør / Deep Shaft .....	41
7	Nøgletal og benchmarking.....	43
7.1.1	Metode .....	43
7.1.2	Refleksion over nøgletal og benchmarking .....	47
8	Afgrænsning af undersøgelser .....	49
9	Skrivebordsundersøgelser.....	50
9.1	Rislefiltre.....	50
9.2	Luftbehov og blæsertyper .....	50
9.2.1	Tilpasse luftmængder til behov.....	50
9.2.2	Udnytte/tilføre luften effektivt i bassinet.....	51
9.2.3	Vælge den mest energieffektive blæser .....	51
9.3	Iltkegler .....	54
9.4	ReOx .....	55
9.5	U-rør / deep shaft .....	57
9.5.4	Designforslag for deep shaft / U-rør .....	57
9.6	Rentabilitet af pumpekift.....	58
9.7	Coatede pumper .....	60
10	Forsøg ved Abildvad ørreddambrug .....	66
10.1	Indledning .....	66
10.2	Formål.....	66
10.3	Udførte forsøg.....	66
10.3.1	Forsøgsopstilling i kumme på Abildvad dambrug.....	67
10.3.2	Forsøgsbeskrivelse.....	68
10.3.2	Forsøgsbeskrivelse.....	69
10.3.3	Sammenfatning Abildvad .....	70
10.3.4	Forsøg 1 (Beluftning med den eksisterende diffusor).....	70
10.3.5	Forsøg 2 til 4 (Beluftning med lavtryksdiffusor ved 3 forskellige luftflow) .....	70
10.4	Konklusion Abildvad .....	71
11	Forsøg ved Kølkær Fiskeri.....	73
11.1	Formål.....	73
11.2	Forsøgsbeskrivelse.....	73
11.3	Resultater af målingerne af mammutpumpe på Kølkær ørreddambrug 13. juli 2008 .....	75
11.3.1	Energibetragtninger.....	76

---

11.3.2	Abildvad.....	78
12	Rapport Laboratoriedel, .....	79
12.1.1	Formål med forsøgene: at finde årsager til energiforbrug på dambrugene.....	81
12.1.2	Forsøgsbeskrivelse vedr. bobleforsøg.....	82
12.1.3	Forsøg 1, 2 og 3 .....	83
12.1.4	Forsøg 5 .....	83
12.1.5	Resultater .....	84
12.2	Konklusion / sammenfatning. ....	86
13	Sammenfatning og konklusion.....	88
13.1.1	Afgrænsning af projektet .....	89
13.1.2	Konklusioner fra skrivebordsundersøgelser.....	89
13.1.3	Konklusioner fra forsøg i dambrugsbassin .....	90
13.1.4	Forsøg i laboratorium.....	92
13.1.5	Samlet konklusion:.....	92
14	Perspektivering .....	94
14.1.1	Cirkulation af vand i dambruget: .....	94
14.1.2	Beluftning af vandet:.....	94

## 2 Indledning

Formålet med dette projekt er at belyse mulighederne for at designe dambrug på en energioptimal måde for derved at imødekomme de massive stigninger i energiforbrug, der må forventes at komme som følge af et intensiveret opdræt, baseret på anvendelse af renseteknologier til genanvendelse af vand. Målgruppen er ørreddambrug og åleopdræt.

### 2.1 Baggrund

Der stilles stigende miljømæssige krav til dambrugserhvervet. Kravene medfører at der ikke må indtages lige så meget vand fra vandløb som tidligere og at udledningen af næringsstoffer til vandløbet skal holdes på nuværende niveau.

For at imødekomme disse krav vælger mange af de traditionelt opbyggede ørreddambrug at omlægge deres produktion til hel- eller delvis recirkulering af dambrugsvandet efter det koncept som kaldes model-dambrug. Derved kan det samme vand anvendes flere gange, og næringsstoffer fjernes for en stor del fra vandet i biofiltre og plantelaguner, som er integrerede elementer i det recirkulerende dambrug.

Ved projektets opstart blev der gennemført undersøgelser på de 8 recirkulerende ørredanlæg, der indtil da var bygget i Danmark. Undersøgelserne viste, at elforbruget steg med 100% ved omlægning fra traditionelt ørreddambrug til recirkulerende dambrug. Stigningen skyldes at der i det recirkulerende anlæg i langt højere grad anvendes pumper og blæsere for hhv. at flytte vandet rundt i anlægget og for at ilte, rense og afgasse vandet så det er tilstrækkeligt rent og iltholdigt i opdrætsbassinerne.

### 2.2 Problemformulering og fokus i projektet

Inden for de kommende år forventes det, at en stor del af danske dambrug omlægges til en form for recirkulering. Konkret er der ved projektets afslutning indført recirkulerende teknologi på ca. 1/3 af den samlede danske produktionskapacitet indenfor ørred. Derfor er det relevant at undersøge, hvilke muligheder der er for at designe de recirkulerende anlæg, så energiforbruget i forhold til den producerede mængde fisk bliver så lavt som muligt.

#### 2.2.1 Problemformulering

Hvordan kan recirkulerende anlæg til fiskeopdræt designes, så energiforbruget i forhold til den producerede mængde fisk bliver så lavt som muligt?

Under hensyntagen til:

- Fiskevelfærd
- Miljøkrav
- Driftssikkerhed
- Størrelse og tilbagebetalingstid på investeringer

Fokus i projektet fordeler sig på 5 hovedemner:

1. Indledende beskrivelse af dambrugserhvervet og de vilkår der gælder for fiskeopdræt
2. Teori om iltning og afgang samt gennemgang af forskellige iltning- og beluftningsprincipper
3. Energinøgletal og benchmarking imellem dambrugene for at identificere sammenhænge mellem energiforbrug og valg af teknologi og design af anlæg
4. Skrivebordsundersøgelser og refleksioner om energieffektiviteten ved forskellige teknologivalg
5. Forsøg i laboratorium og udvalgte dambrug for at dokumentere energieffektiviteten af forskellige metoder til beluftning og flytning af vand

### 2.3 Deltagere

I anlæg til åleopdræt er der allerede mange års erfaring med recirkulering, idet disse anlæg er installeret indendørs i bassiner uafhængigt af vandløb. Vandet til driften af anlægget kommer typisk fra egen boring eller kommunal vandforsyning. For at drage nytte af åleproducenternes flerårige erfaring med recirkulerende anlæg har 2 af deltagerne i projektet været åleproducenter.

Følgende har deltaget i projektet:

Deltager	Karakteristik / rolle i projektet
Kongeåens Dambrug	Model 3 ørreddambrug. Produktion af portionsørreder
Kærhede Dambrug	Ørreddambrug, udenfor kategori. Bl.a. produktion af portionsørreder
Hygild Dambrug	Traditionelt ørreddambrug. Produktion af portionsørreder + fisk til ”put & take” søer
Lyksvad Fiskefarm	Åleproducent
Steensgård Åleopdræt	Åleproducent
Abildvad Dambrug	Model 1 ørreddambrug med model 3 teknologi. Produktion af fisk til udsætning i havbrug
Kølkær Fiskeri	Model 1 ørreddambrug. Produktion af portionsørreder
Dansk Akvakultur	Brancheforening og konsulent i forbindelse med design af nye anlæg
Teknologisk Institut	Specialist indenfor beluftnings- og pumpeteknologi
Lokalenergi	Projektleder og konsulent indenfor energi

## **3 Beskrivelse af dambrug og erhverv**

### **3.1 Ferskvandsdambrug**

Der findes omkring 250 danske ferskvandsdambrug hvoraf omkring 200 drives som traditionelle dambrug med varierende grader af elforbrugende udstyr. Traditionelt er disse dambrug blevet drevet som gennemstrømningsanlæg med ved vandindtag over stemmeværk. Energiforbruget på disse anlæg har været begrænset til små pumper og andet udstyr der anvendes i forbindelse med flytning af fisk og oprensning af damme.

#### **3.1.1 Produktionsudvidelser på traditionelle dambrug**

Det har i teorien været muligt for et traditionelt dambrug at få opskrevet sin fodertildeling. I praksis er dette dog ikke sket i ret mange tilfælde, da dette kræver en flerårig og kostbar dokumentationsfase af udledningen før og efter en modernisering.

Selv om måleprogrammet før og efter en ombygning dokumenterer, at en foderopskrivning er mulig, kan myndigheden undlade at give denne, med henvisning til at ”den reducerede udledning skal komme miljøet til gode”

Denne praksis har i mange år begrænset erhvervets mulighed / vilje til udvikling da investeringer i renseforanstaltninger ud over dambrugsbekendtgørelsens minimumskrav ikke automatisk medførte muligheden for at forbedre rentabiliteten i driften og dermed tilbagebetaling af investeringen.

#### **3.1.2 Modeldambrug**

Med modeldambrugsbekendtgørelsen er det blevet muligt at forøge produktionen ved at ombygge et dambrug og blive miljøgodkendt som modeldambrug. Dette har betydet at en række danske ferskvandsdambrug er blevet moderniseret. For modeldambrugene gælder dambrugsbekendtgørelsens krav til fodersammensætning udledning og foderkoefficient.

Modeldambrugene er primært designet til at reducere udledning af næringsalte og iltforbrugende stoffer.

### **3.2 Miljøkrav og regulering af ferskvandsdambrug**

De danske dambrug er på en lang række områder underlagt miljølovgivningen og reguleres ud fra en fast fodertildeling, samt vejledende udlederkrav for næringsstoffer og iltforbrugende stoffer.

#### **3.2.3 Lovgrundlag for regulering ferskvandsdambrug**

De danske ferskvandsdambrug reguleres ud fra; Dambrugsbekendtgørelsen, planloven, vandløbsloven, modeldambrugsbekendtgørelsen, fiskerilovgivningen samt miljøbeskyttelsesloven.

#### **Fodertildeling**

Alle danske ferskvandsdambrug har fået fastsat en maksimal mængde tilladeligt foder baseret på nær- og slutrecipienten samt til en hvis grad ud fra foderforbrug før dambrugsbekendtgørelsens ikrafttræden. I praksis betyder det at dambrugsproduktion bliver reguleret ud fra en fastsat foderkvote og ikke den reelle udledning fra dambruget.

Reguleringen sker således på grundlag af:

- Fodertildeling
- Vejledende udlederkrav
- Foderkoefficient maks. 1,0 med mindre der er tale om avlstdambrug med moderfisk
- Krav om maksimalt fosforindhold i fodret
- Krav til at anvendt foder skal være tørfoder
- Krav om afgivelse af frivand ( $\frac{1}{2}$  Qmm<sup>1</sup>)
- Krav om afgitring ved vandindtag

### 3.2.4 Modeldambrugsbekendtgørelsen

Modeldambrugsbekendtgørelsen giver muligheder for og retningslinjer for ombygninger og moderniseringer af dambrug. Indførelsen af renseforanstaltninger på dambruget medfører muligheden for foderopskrivninger. Dog er det stadig de eksisterende foderkvoter der ligger til grund for de mulige foderopskrivninger.

Den maksimale udledning fra modeldambruget beregnes ud fra den oprindelige foderkvote / beregnede produktionsbidrag og rensegrader. Dertil kommer eventuelle foderkvoter i form af tilkøb eller flyttet foder fra sammenlægning af dambrug. Det betyder at dambruget efter ombygning i teorien reguleres efter udledning. For nuværende er den begrænsende faktor udledning af kvælstof og der arbejdes på metoder til forbedret rensning.

### 3.2.5 Foderkoefficient og produktionsbidrag:

Foderkoefficienten og produktions bidraget hænger nøje sammen. Ved at opnå en bedre foderkoefficient / foderkonvertering opnås et lavere produktionsbidrag, hvilket betyder mindre belastning af renseforanstaltninger, samt udledning af næringsstoffer.

#### Foderkoefficient

Foderkoefficienten er defineret som den mængde foder der går til at producere et kg fisk:

- *Kg foder pr kg produceret fisk*

Den bedste (laveste) foderkoefficient opnås, når fiskene har optimale forhold. Hvis fiskene ikke trives, kan det påvirke fiskenes ædelyst og sundhed og dermed reduceres væksthastigheden for fiskene. Den reducerede ædelyst resulterer i et ”tomgangstab” da fiskenes basale energiforbrug er konstant.

- *For portionsørreder ligger foderkoefficienten mellem 0,8 og 0,95 det vil sige at 800 – 950 g foder giver et kg fisk.*
- *For ål ligger foderkoefficienten mellem 1,6 og 1,8*

#### Produktionsbidrag

Ved produktionsbidraget forstås den del af næringsstofferne i det tilsatte foder, der ikke indbygges i fisken. Ved en god foderudnyttelse (foderkoefficient) opnås det laveste produktionsbidrag. Et højt

---

<sup>1</sup> Qmm: median-minimumsvandføringen i vandløbet. Er et udtryk for hvor meget vand der som minimum er i et vandløb over en given tidsperiode. I praksis et udtryk for hvor lidt vand der er i vandløbet en tør sommerperiode.



produktionsbidrag medfører en højere udledning / belastning af renseforanstaltninger. Dambrugeren har stor interesse i at holde foderkoefficienten så lav som muligt, da dette medfører den bedste økonomi i produktionen.

### 3.3 Åleopdræt

De danske åleopdræt er praktisk set fuldt recirkulerede, det vil sige at de drives uden vandudskiftning. Det eneste vand der forlader systemerne er det vand der forsvinder ved fordampning, fjernelse af slam, samt transport af ål.

Det betyder at der over tid vil være en betydelig ophobning af affaldsstoffer i vandet der skal tages vare på. Som følge af det intensive fiskeopdræt og den store recirkuleringsgrad kræves stabile og robuste vandrensningsteknologier. Da anlæggene blev opført lå fokus primært på selve vandrensningsteknologien og der blev ikke fokuseret så meget på energieffektiviteten.

For at drive disse anlæg kræves energi til rensning og iltning af vand, dertil kommer energiforbrug til desinfektion af vand.

#### 3.3.6 Miljøkrav ved åleopdræt

Da ålebrugene stort set er fuldt recirkulerede og derfor ingen direkte udledning har, er de ikke underlagt samme regler som dambrugene. For ålebrugenes vedkommende er det kun harmoni reglerne med hensyn til udbringning af slam (husdyrgødning), samt evt. overskudsvand fra produktionen. Der er derfor ingen krav til anvendt foder eller foderkoefficient

#### 3.3.7 God vandkvalitet og opdrætsforhold generelt

Fiskenes trivsel er en vigtig parameter i fiskeopdræt og har stor indflydelse på driftsøkonomien i opdrættet. Hvis vandkvaliteten er for dårlig eller vandets temperatur og pH varierer for meget bliver fiskene stressede. Stressede fisk er mere modtagelige over for sygdomme, parasit- og svampeangreb, samtidigt med at foderkonverteringen er dårligere.

Ved god vandkvalitet forstås at vandets indhold af ilt er tilstrækkeligt, indhold af affaldsstoffer og opløste gasser er på et "acceptabelt" niveau samt at parametre som temperatur og pH er konstante. Selvom vandkvalitetsparametrene overholdes, kan der alligevel forekomme mistrivsel – specielt hvis enkelte parametre varierer. Omvendt kan det også forekomme at flere parametre ligger udenfor det normalt acceptable, men hvor der alligevel er god fisketrivsel, fordi der er stor stabilitet i driftsforholdene.

Hvad enten man opdrætter ørreder eller ål er der en lang række forhold der er ens for alle slags fiskeopdræt. Fiskene kræver ilt og foder og producerer en række affaldsstoffer. Disse affaldsstoffer skal fjernes fra fiskene. I forbindelse med fiskeopdræt og design af opdrætssystemer kan man opstille en række behov/barrierer der skal opfyldes i den rækkefølge de opstår i takt med at recirkuleringen og fisketætheden bliver mere intensiv.

1. Iltforsyning til fiskene
2. Fjernelse af suspenderet stof (trivsel og sygdomsforebyggelse)
3. Ammonium (NH<sub>4</sub>) og opløst organiske materiale
4. CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>
5. NO<sub>3</sub> (nitrat), svært nedbrydelige organiske forbindelser

### 3.4 Fiskene forsyningsbehov

Fiskene har to primære behov i forbindelse med opdrættet: ilt og foder.

#### 3.4.8 Ilt

Fiskene optager deres ilt fra opløst ilt i vandet. Det er derfor vigtigt at det vand fiskene går i har et tilstrækkeligt iltindhold. For at fiskene har optimale forhold kræves en iltmætning på mindst 70%, ved lavere iltmætninger opserveres en forringet foderkoefficient.

#### 3.4.9 Foder

Fiskenes energibehov dækkes gennem fodret. Et moderne fiskefoder er et tørfoder der primært består af fedt og protein. Forholdet mellem protein og fedt er afpasset så fiskene lige præcist får dækket deres protein behov til opbygning af væv, fedtet i fodret tjener som energikilde. Fodres fisken med et overskud af protein anvendes dette som energikilde med forhøjet kvælstofudskillelse som følge.

### 3.5 Fiskenes produktion af affaldsstoffer

Fiskene udskiller affaldsstofferne  $\text{CO}_2$  og  $\text{NH}_4$  ammonium over gællerne. Dertil kommer suspenderede stoffer og organiske materiale. I recirkulerede systemer er der risiko for at disse ophobes og bliver skadelige for fiskene.

#### 3.5.10 $\text{CO}_2$ Kultveilte

$\text{CO}_2$  er et affaldsprodukt fra fiskens stofskifte. Man kan antage at alt den ilt fiskene optager udskilles igen som  $\text{CO}_2$ . I recirkulerede systemer kan der opbygges forhøjede koncentrationer af  $\text{CO}_2$ . I forhøjede koncentrationer kan  $\text{CO}_2$  have en negativ indflydelse på fiskens trivsel og i yderste tilfælde være skyld i fiskedød.  $\text{CO}_2$  binder sig bedre ca. 400 gange bedre end ilt til fiskens blod og kan derfor i forhøjede koncentrationer forhindre fisken i at optage tilstrækkelig med ilt.

Da symptomerne på forhøjede  $\text{CO}_2$  koncentrationer er de samme som ved iltmangel forveksles disse ofte.

Korttidseffekt af højt kuldioxid koncentration i vandet:

- Reducerer fiskens kuldioxid-udskillelse (bruger unødigt energi til hyperventilering)
- Reducerer fiskens iltoptagelse
- Forsuring af fiskens blod
- Iltovermætning i vand kan yderligere reducere fisken respiration, hvilket har en forstærkende virkning på den manglende  $\text{CO}_2$  udskillelse fra fisken.

Langtidseffekt af højt kuldioxid i vandet hos fisken:

- Nefrokalsinose (kalkaflejring i nyre)
- Appetitløshed
- Reduceret vækst
- Sløvhed
- Blodmangel
- Øget dødelighed

For laksesmolt er det set, at et indhold af kuldioxid på 20 mg/l i vandet i ferskvandsfasen reducerer væksten efter udsætning i havbruget med op til 30 % (efter 90 dage i havbrug). Skadevirkninger af højt kuldioxidindhold i vandet over længere tid kan derfor være kroniske.

### **3.5.11 NH<sub>4</sub> Ammonium**

Fiskene udskiller overskudskvælstof i form af ammonium. Ammonium kan i selv små koncentrationer være giftigt for fiskene. I recirkulerede systemer er det nødvendigt at rense vandet for ammonium. Den mest effektive metode til fjernelse af ammonium er brug af biofiltre. Giftigheden af ammonium er pH afhængig ved lav pH falder giftigheden. Dette udnyttes på ålebrug hvor pH i vandet sænkes og giftigheden af ammonium kan dermed kontrolleres til en hvis grad.

### **3.5.12 Suspenderede stoffer (organisk materiale)**

Suspenderede stoffer og organiske partikler i opdrætsvandet kan give problemer med vandkvaliteten. Partikler i vandet kan give gællebetændelse / gælleproblemer hos fiskene. Problemet er størst i forbindelse med små fisk og yngel. Suspenderede stoffer kan fjernes ved bundfældning eller mekanisk ved filtrering gennem kontaktfiltre eller mikrosigter.

Hvis de suspenderede stoffer får mulighed for at bundfælde sig ukontrolleret i systemerne, vil der dannes ”slam lommer” med iltfrie forhold, hvor der kan produceres svovlbrinte og metangas. Dette kan resultere i bundvendinger der næsten øjeblikkeligt dræber fiskene.

## **3.6 Opbygning af opdrætsanlæg**

Generalisering over principperne i de forskellige dambrugstyper.

### **3.6.13 Det ”traditionelle” dambrug**

De traditionelle dambrug tager vand ind ved en opstemning af åen. Vandet ledes fra opstemningen ind på dambruget via en fødekanal. Fra fødekanalen fordeles vandet ud til opdrætsdammene. Vandforsyningen til de enkelte damme reguleres ved opstemning. ”Brugt” vand fra damme ledes via en bagkanal til et bundfældningsbassin, hvor partikler sedimentere inden udledning til åen.

Under normale forhold dækker det indvundne vand fiskenes behov for ilt, samt sørger for tilstrækkelig strømningshastighed til at transportere foderrester og fækalier ud af opdrætsdammene.

Energiforbruget på et traditionelt drevet dambrug er i sagens natur meget lavt, da der ikke anvendes energi til beluftning og transport af vand. De eneste energiforbrugende foranstaltninger er fiskepumper, slampumper etc. der kun anvendes lejlighedsvis

Gennem de sidste år er dette billede ved at ændre sig. I forbindelse med at dambrugene skal afgive halvdelen af Q<sub>mm</sub> (medianminimums vandføringen) i vandløbet, hvilket ofte betyder at dambruget skal klare sig med en reduceret friskvandsforsyning. Derfor får dambrugene i stigende grad behov for at genanvende vandet.

#### **Returpumper:**

I forbindelse med afgivelse af frivand – for at sikre tilstrækkelig vandføring i vandløb - kan der opstå behov for returpumpning af vand fra bagkanal til fødekanal for at sikre tilstrækkelig iltforsyning og vandføring. Da de fleste traditionelle dambrug ikke er anlagt til returpumpning kan

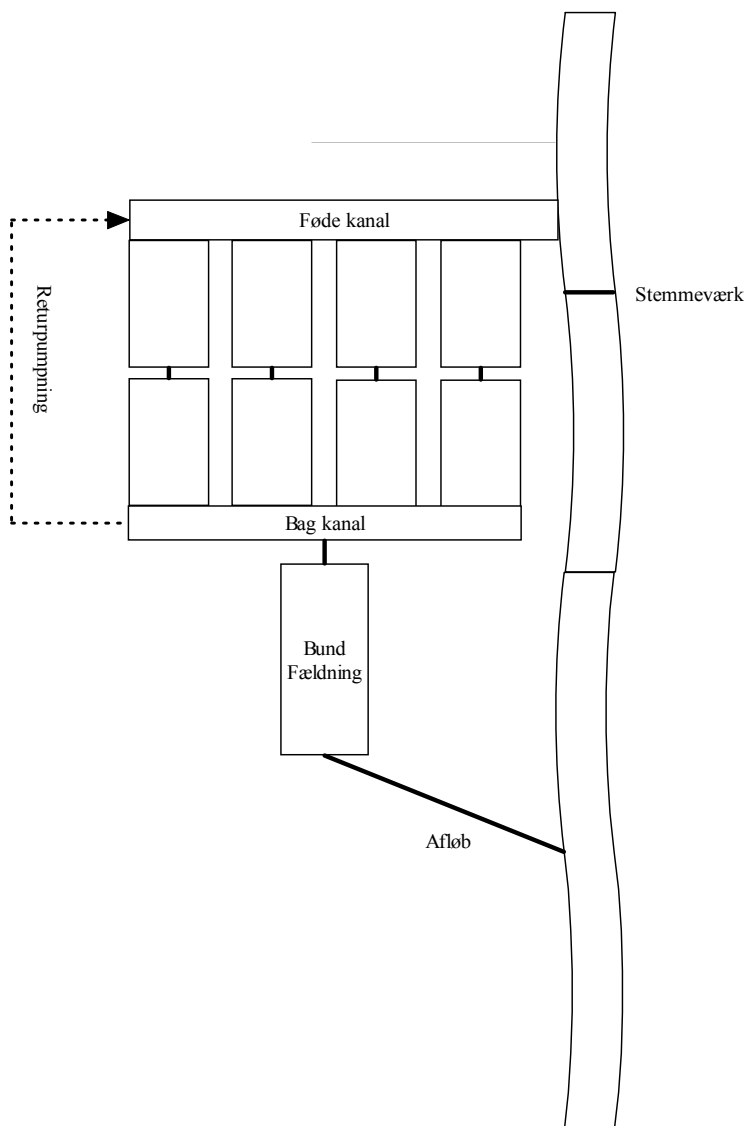
dette medføre at store vandmængder skal pumpes med høj løftehøjde. I forbindelse med en returpumpning kan vandet med fordel opiltes over et rislefilter.

**Overfladebeluftere:**

Overfladebeluftere, se 6.1, anvendes i situationer hvor der ikke er tilstrækkeligt friskvand til at sikre ilt til fiskene. Overfladebeluftere kan ikke sikre optimale iltbetingelser, men er til gengæld uhyre effektive til at holde fiskene i live ved lave iltkoncentrationer.

**Nøgletal**

Fisketæthed	10-15 kg / m <sup>3</sup>
Vandforbrug	2,5- 5 l/ sek. vand pr ton fodertildeling pr år
Energi forbrug	0-1 kWh pr kg foder



**Figur 1 Traditionelt dambrug**

### 3.7 Modeldambrug

I forbindelse med modeldambrugsbekendtgørelsen er der anvist 3 mulige modeller. I praksis er der kun blevet anlagt type 1 og 3 dambrug. Plantelagunens størrelse udløser en fast mængde ekstra foder på 1 ton pr 100 m<sup>2</sup>.

Type 1 og 3 har begge plantelaguner, forskellen ligger i maksimalt tilladeligt vandforbrug og intensiteten af vandrensningen. Modeldambrug type 3 anvender biofiltre. Et type 2 dambrug er i praksis en model 3 uden plantelagune og dermed det ekstra foder.

**Tabel 1: Krav om drift og indretning af modeldambrug. Angivelserne for vandindtag og daglig udfodring er i forhold til et foderforbrug på 100 tons pr. år på modeldambrug, kilde: modeldambrugsbekendtgørelsen**

Typer af modeldambrug	Model I	Model I a	Model II og II a	Model III og III a
Damtype	Jord eller beton	Jord eller beton	Jord eller beton	Beton
<b>Driftsforhold</b>				
Recirkuleringsgrad (min. %)	70	85	85	95
Opholdstid i produktionsanlæg (min. timer)	1,8	3,6	12,3	18,5
Fisketæthed (max. kg/m <sup>3</sup> )	50	50	50	50
Vandindtag (max. l/sek.)	125	62,5	60	15
Maksimal daglig udfodring (kg)	800	800	800	800
<b>Rensforanstaltninger</b>				
Decentrale bundfældningszoner	Ja	Ja	Ja	Ja
Anlæg til partikelfjernelse	Ja	Ja	Ja	Ja
Biofilter	Nej	Nej	Ja	Ja
Plantelagune	Ja	Ja	Nej	Ja

#### 3.7.14 Mikrosigter

På en lang række dambrug anvendes mikrosigter til mekanisk filtrering af opdrættsvandet. Mikrosigter er effektive til at fjerne større partikler og dermed reducerer mikrosigter belastningen af biofiltre med hensyn til organisk materiale. På modeldambrug er der lovkrav om at filterdugen må have en maksimal maskestørrelse/lysning på 0,074 mm. Der er indikationer på at anvendelse af en filterdug med en mindre lysning vil kunne reducere smittepresset af visse parasitter. Under drift kan mikrosigterne producere små partikler, hvilket kan være et problem specielt i opdrættet af yngel og sættefisk.

For at fjerne det opsamlede materiale samt for at forhindre at filterdugen stopper til er det nødvendigt at rense dugen. Dette sker ved en række højtryksdyser der kontinuert spuler filterdugen.

På mange dambrug kører mikrosigter i konstant drift. Der findes modeller der er indrettet med styring af drivmotor og spulepumpe. Det må forventes at der er potentiale for energibesparelse ved anvendelse af denne teknologi.

### Styring af mikrosigter

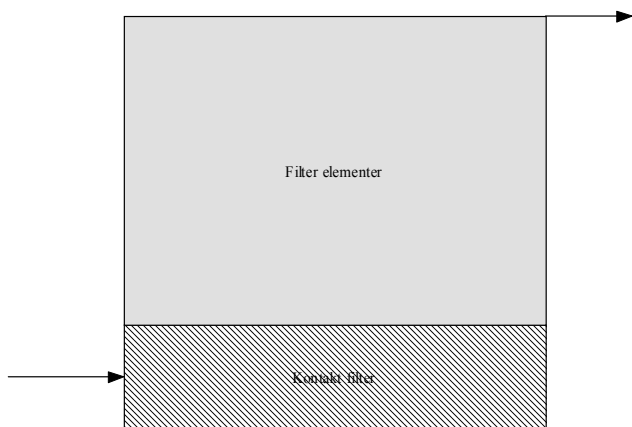
Der er beskedne energibesparelser at hente ved styring af drivmotoren. Der kan hentes større besparelser ved kun at lade spulepumpen køre efter behov. Der anvendes et tryk på 5-8 bar ved spuling af filterdugen. Det er dog ikke uden problemer at anvende styring af mikrosigter. Følgende problemstillinger skal imødekommes:

- Risiko for overgroning med alger, kan løses ved at placere mikrosigterne afskærmet fra sollys.
- Start stop styring reducerer levetiden for en elmotor i det miljø motoren er placeret.
- Ved at anvende flere spuledyser placeret tættere på filterdugen vil der muligvis kunne hentes en energibesparelse da denne løsning vil kræve et mindre spule tryk

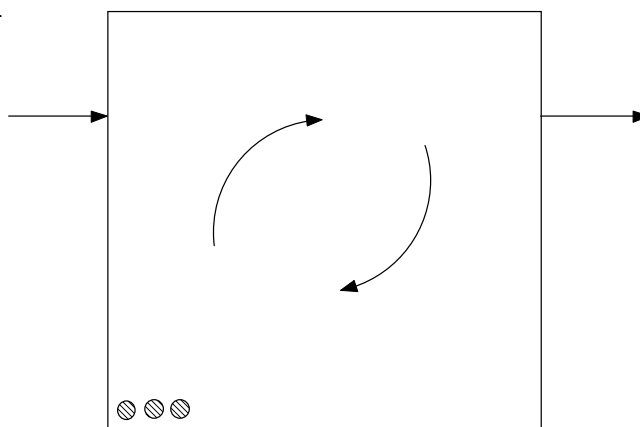
Hos ålebrugene er niveaustyring af mikrosigter allerede udbredt. Dermed starter og stopper spulepumperne efter behov. Udbredelsen her hænger sammen med at ålebrugene er indendørs og at den hydrauliske belastning på mikrosigten er mindre på et ålebrug end på et dambrug.

### 3.7.15 Biofiltre

Der anvendes 2 typer biofilter principper i danske opdrætsanlæg: fastmedie filtre og bevægeligt medie filtre. Derudover er der for model dambrug type 3 lovkrav om at der skal anvendes enten kontaktfiltre eller mikrosigter til partikelfjernelse. Det er Dansk Akvakulturs erfaring, at de fleste af de dambrug der blev indrettet med kontaktfiltre i forsøgsperiodens begyndelse har senere fået efterinstalleret mikrosigter, da dette har en positiv effekt på driften af dambruget.



Figur 3: Skitse af fast medie filter



Figur 2: Skitse af bevægeligt medie filter

### Fastmedie filter

I et fastmedie biofilter bevæger vandet sig gennem filterelementerne. Der vil med tiden opstå kanaler i biofilteret, hvor vandet passerer og filteret vil langsomt miste sin effekt. Løsningen på dette er en returskylning når behovet opstår. Returskylning foregår ved at blæse store mængder luft gennem en sektion i filteret, hvorved der skabes en voldsom omrøring. Denne omrøring renses filterelementerne mekanisk så slam løsrives. Efter rensning pumpes slam og snavset vand på slamdepot.

Svag beluftning af filteret forbedrer ammonium omsætningen da der skabes bedre omrøring og iltforhold i filteret.

Det kan ikke undgås at der opstår iltfrie områder i et filter med fastmedie. I disse områder vil der omdannes nitrat til frit kvælstof ( $N_2$ ). Denne omdannelse betyder i praksis at kvælstoffet ikke længere er på opløst form, og derfor er omdannelsen god for dambrugets udledningstal. Til gengæld kan omsætningen resultere i gasovermætning med kvælstof

### **Fordele**

- God partikel fjernelse
- Kvælstof reduktion som følge af anaerobe forhold i filteret
- God omsætning og fjernelse af organisk materiale

### **Ulemper**

- Skal returskylles. Giver store mængder beskidt skyllevand, som skal håndteres
- Lavere ammonium omsætning end ved anvendelse af bevægeligt medie
- Kanaldannelse i filtermediet

### **Bevægeligt medie filter**

I et filter med bevægeligt medie roterer vand og filterelementer rundt mellem hinanden, drevet af luft. Et filter med bevægeligt medie kræver ingen returskylning da det er selvrensende, Bevægeligt medie filtre er generelt mere stabile i deres ammonium omsætning end fast medie filtre på grund af at der altid er optimale iltforhold for de nitrificerende bakterier.

Ved anvendelse af et filter med bevægeligt medie kræves mikrosigter til partikelfjernelse da der konstant løsrives organisk materiale fra filterelementerne. De partikler filteret frigiver, er dog så store at de ikke generer fiskene. Ydermere bevirker filteret, at små organiske partikler samler sig til større partikler, så problemerne med suspenderede stoffer i et bevægeligt medie filter er forholdsvis lavt.

Energiforbruget til et biofilter med bevægeligt medie er højere end til et biofilter med fast medie. Til gengæld er beluftningen og afgangningen af vandet bedre og man har ikke samme problemer med slamvand fra returskylning

### **Fordele:**

- God omsætning af ammonium
- God omsætning af organisk stof
- Kræver ingen returskylning

### **Ulemper:**

- Højere energi forbrug ved drift (ikke ren spild, da der spares beluftning andre steder i systemet)
- Producerer organiske partikler
- Ingen kvælstofreduktion

### 3.7.16 Design filosofier.

I forbindelse med design af recirkulerede systemer er der mange problemstillinger der skal imødekommes. Da vandet virker som transportmedie til iltforsyning samt fjernelse af affaldsstoffer, indgår vandføring som det mest kritiske parameter. Med hensyn til vandføringen i systemer er der to hovedfilosofier. Vandet anvendes enten til at:

- Forsyne fiskene med ilt
- Fjernelse af affaldsstoffer

Ved anvendelse af et design hvor vandet forsyner fiskene med ilt vælges oftest en ”kanal” løsning hvor hele vandmængden flyttes rundt i anlægget.

Ved anvendelse af et design hvor vandet fjerner affaldsstoffer vælges oftest en ”kumme / redekam” løsning hvor en mindre vandmængde flyttes rundt i systemet og fiskene forsynes med ilt ved supplerende beluftning.

Der er styrker og svagheder ved hvert design.

#### **Kanalsystemer**

Fordele

- Billigere i anlægsfasen

Ulemper

- Stort vandvolumen flyttes
- Større risiko for fiskedød (døde / svage fisk kan blokere udløbsriste, og dermed stoppe for friskvandstilførslen)

#### **Kummesystemer / Redekam**

Fordele

- Større driftsikkerhed (Lavere risiko for fiskedød som følge af iltmangel)
- Mindre vandvolumen der skal flyttes

Ulemper

- Højere anlægsomkostninger

Hvilken løsning der anvendes er ofte bestemt ud fra en ”helhedsløsning” for dambruget med grundlag i hvad der er praktisk og økonomisk muligt at udføre på dambruget.

### 3.7.17 Modeldambrug type 1

Modeldambrug type 1 indtager vand fra vandløb enten ved stemmeværk eller ved en indpumpning. Vandindvindingen kan suppleres med drænvand til sættefisk eller til produktionskummer, da grunden under betonanlæg ofte kræver dræning for at sikre anlægget mod at flyde op når det tømmes for vand.



## **Beluftning og decentrale renseforanstaltninger**

### **Opdræts kummer / kanaler**

Da friskvandsforsyningen er reduceret i forhold til et traditionelt dambrug, samtidig med at fisketætheden i anlægget er større, er det nødvendigt at foretage en supplerende beluftning af vandet. Der er lovkrav om at der skal foretages decentral bundfældning, hvilket betyder at der skal anvendes slamfang i hver opdrætssektion.

### **Kanal eller kumme / redekam design**

Fiskene kan enten holdes i større kanalsystemer, der er inddelt i mindre enheder med riste eller i kummeanlæg der er opbygget af en række parallelforbundne opdrætskummer med fælles til- og fraløb.

### **Kanal anlæg:**

I kanal anlæg er renseforanstaltninger og mammutpumper bygget sammen og afgrænset med riste. Partikler bundfældes i slamfang umiddelbart før mammutpumpen. I kanal anlæg opererer mammutpumpen med en løftehøjde på ca. 10cm

### **Kummesystemer / redekam:**

I kummeanlæg foretages slamfjernelsen i kummens udløbsende. Kummer forsynes med beluftet friskvand, desuden kan kummer være udstyret med intern beluftning.

### **Partikel fjernelse**

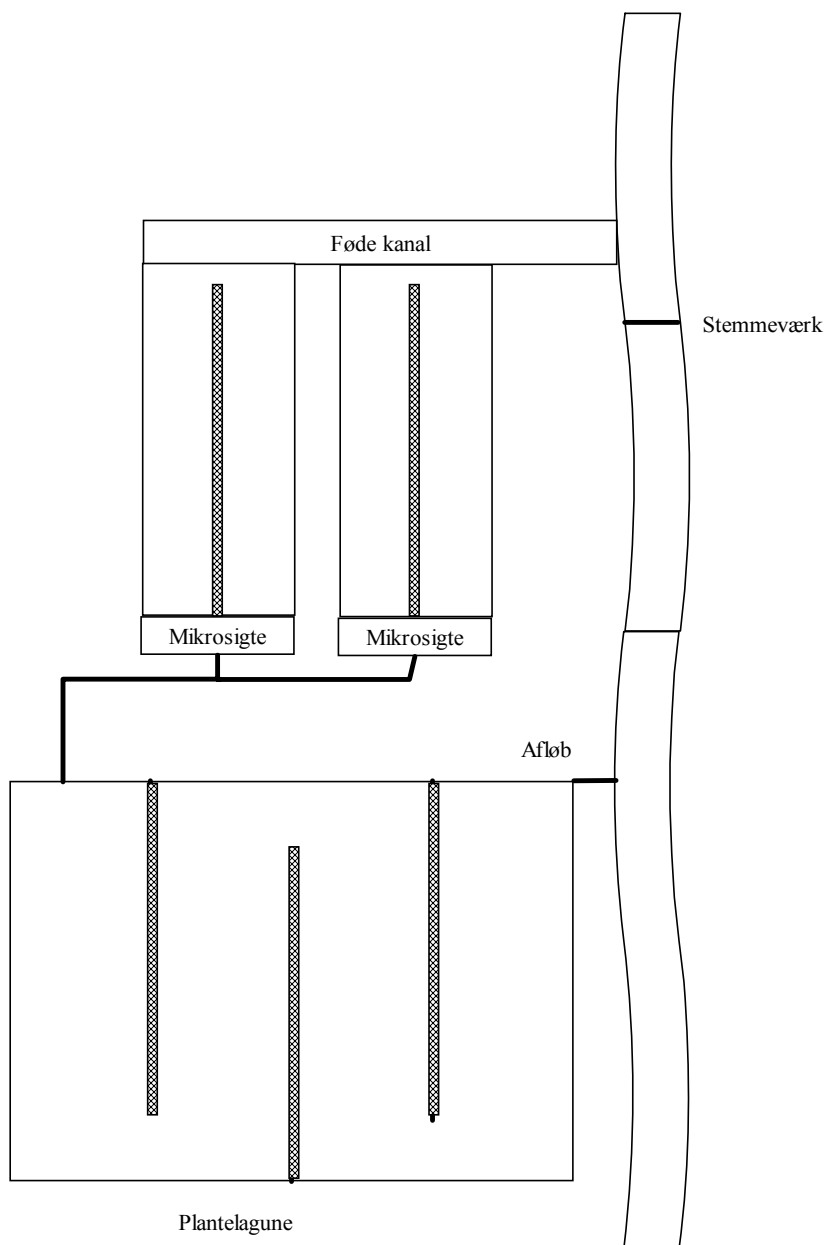
Der er lovkrav om anvendelse af mikrosigter i et model 1 dambrug. Udløb fra dambruget er placeret efter mikrosigten.

### **Plantelagune**

Afløbsvandet fra dambruget ledes gennem en plantelagune der står for den sidste vandrensning inden udløb til vandløbet

### **Nøgletal**

Fisketæthed	50 Kg / m <sup>3</sup>
Vandforbrug	0,6 – 1,25 l/sek. vand pr ton fodertildeling pr år foder
Energi forbrug	1-1,5 kWh pr kg foder



Figur 4 princip diagram af et model 1 dambrug

### 3.7.18 Modeldambrug type 3

Modeldambrug type 3 adskiller sig fra model 1 ved at anvende langt mindre friskvand, samtidigt med at der foretages biologisk vandrensning. Modeldambrug type 3 indtager vand fra dræn eller boring og i enkelte tilfælde ved indpumpning fra vandløb. I nogle tilfælde giver dræning af grunden under betonanlæg nok vand til at drive anlægget og borevand anvendes kun som supplement.

#### Udformning

Udformning af anlægget er meget lig et model 1 dambrug, den eneste forskel er biofilteret. Dette betyder at et model 1 dambrug ofte kan omlægges til et model 3 dambrug ved at installere et biofilter.

Med hensyn til kanalanlæg eller kummesystemer / redekam gælder samme som i model 1 dambrug.

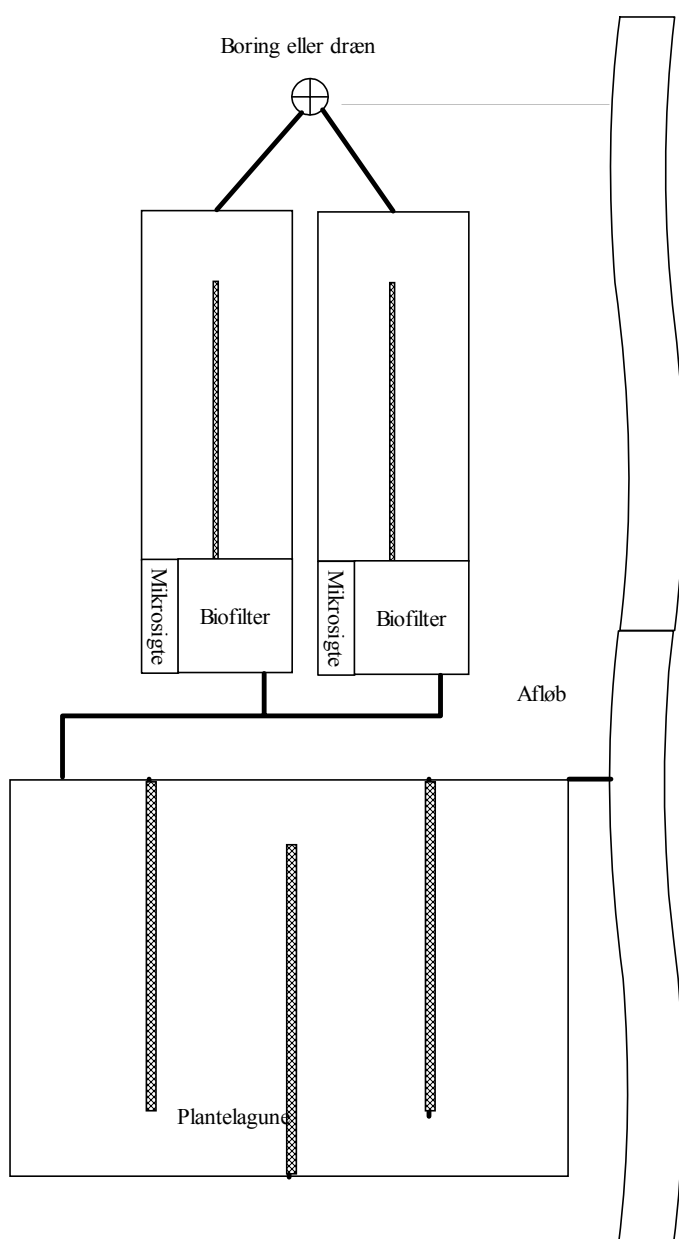
Der er ikke lovkrav om anvendelse af mikrosigter på et model 3 dambrug, men de anvendes ofte som supplement eller erstatning for kontaktfiler.

### Biofilter

Biofilteret er dimensioneret ud fra den forventede maksimale anvendte fodermængde. Udløb fra dambruget er placeret efter biofilteret.

### Plantelagune

Afløbsvandet fra dambruget ledes gennem en plantelagune der står for den sidste vandrensning inden udløb til vandløbet



Figur 5 Princip diagram af et model 3 dambrug

### Nøgletal

Fisketæthed	50 Kg/m <sup>3</sup>
Vandforbrug	0,15 l/sek. vand pr ton fodertildeling pr år
Energi forbrug	1,3-1,8 kWh pr kg foder

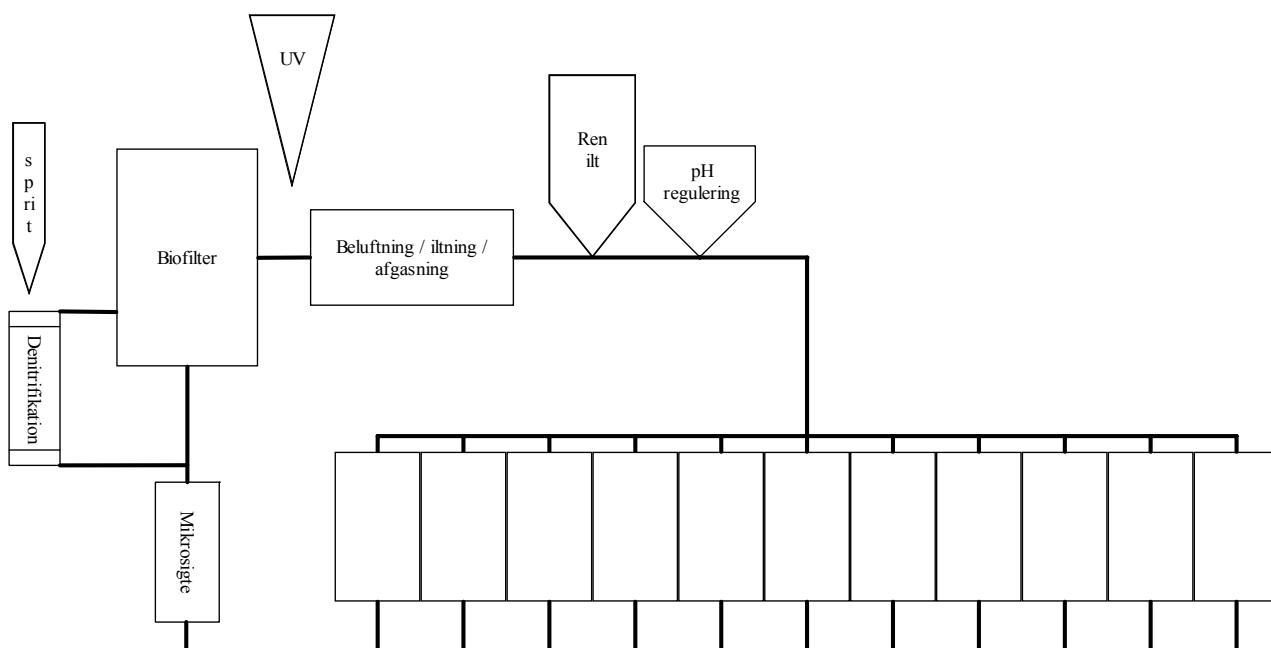
### 3.8 Åleanlæg

De danske ålebrug er indendørs varmtvandsanlæg. Dog ligger den største forskel mellem dambrug og ålebrug i vandforbruget og recirkuleringsgraden. Friskvandsforsyningen på et recirkuleret åleopdræt er begrænset til supplerung af vandtab som følge af fordampning og bortkørsel slam eller transport af ål.

Idet vandudskiftningen er relativt lille er det nødvendigt at have fuld kontrol over vandkvaliteten både med hensyn til opløste gasser og affaldsstoffer samt ophobning af svært eller ikke nedbrydelige stoffer. Derudover skal smittepresset holdes nede ved desinficering af vandet.

Åleopdræt og modeldambrug type 3 virker efter samme princip. Ålene holdes i opdrætsenheder, der forsynes med iltet friskvand. Vand fra opdrætsenheder renses mekanisk med mikrosigter inden det behandles i biofiltre. Efter behandling i biofiltre afgasses / iltes vandet med atmosfærisk luft enten i beluftningsbrønd eller over et rislefilter. Efter rislefilteret opiltes vandet i iltkegler til overmætning inden det pumpes tilbage til ålene.

For at sænke smittepresset kan vandet UV behandles inden det sendes tilbage til ålene. For at holde nitrat og fosfat nede på et acceptabelt niveau kan vandet renses for disse ved fosfor fældning og anaerobe denitrifikationsfiltre – dvs. filtre med et iltfrit miljø, hvor nitrat omsættes til frit kvælstof.



Figur 6 Princip diagram af et ålebrug

**Nøgletal**

Fisketæthed	50 - 300 Kg / m <sup>3</sup>
Vandforbrug	0,02 – 0,14 l/s vand pr. ton årligt foderforbrug
Energi forbrug	4 - 6 kWh / kg produceret fisk

## 4 Iltning- og afgang i dambrug

Som beskrevet i kapitel 3 har fiskene 2 primære behov: ilt og foder. Derfor er det relevant at kigge på:

- Vands evne til at optage og bære ilt
- Fiskenes forbrug af ilt i forskellige aktivitetsstadier
- Systemets iltforbrug i forbindelse bl.a. biologisk omsætning af affaldsstoffer
- Teori omkring beluftningsprocesser
- Teori om gassers opløselighed i vand

Recirkulerende fiskeopdræt er afhængige af at tilføre ilt, idet friskvandsforsyningen ikke længere er tilstrækkelig til at sikre et passende iltniveau.

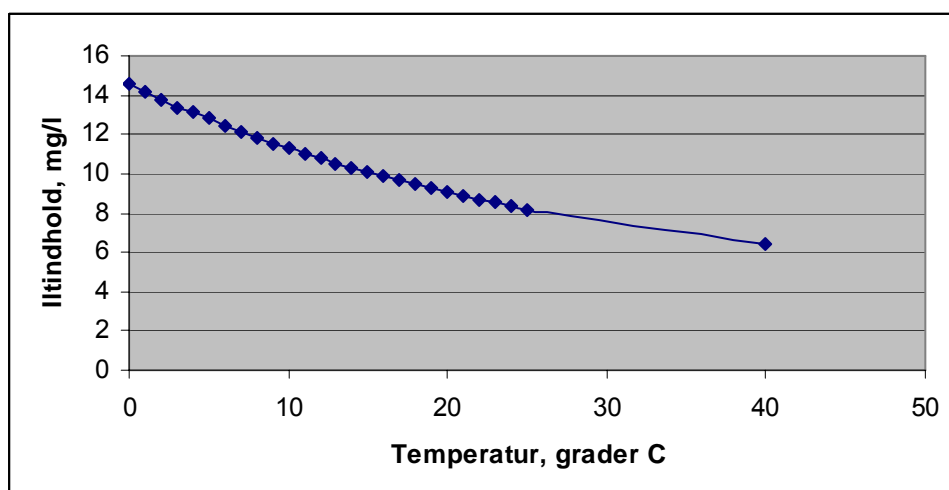
### 4.1 Iltforbrug i dambrug

Dambrugets iltforbrug er primært afhængigt af fiskens aktivitet og udfodring til fiskene. I de anlæg der er indrettet med biologiske filtre er der et vist iltforbrug i filteret. Dertil kommer baggrundsrespiration i vandet, der skyldes mikrobiologisk aktivitet samt oxydering af uorganiske forbindelser.

#### 4.1.1 Vandets iltindhold

Vandets iltindhold er afhængigt af temperatur, salinitet og tryk. I ferskvand er temperaturen den eneste reelle betydende faktor for vandets iltindhold. I åleopdræt kan saliniteten have en betydning. Iltindhold måles enten i % iltmætning, det vil sige hvor mange procent ilt er der i forhold til fuld mætning, eller som opløst ilt i mg pr l.

Koldt vand kan indeholde mere opløst ilt end varmt vand. Figur 7 illustrerer disse forhold. Fiskenes iltforbrug stiger sammen med vandtemperaturen. Dette er problematisk da iltforbrug vil være højest når vandet indeholder mindst ilt.



Figur 7: Iltindhold i mættet vand ved atmosfærisk tryk som funktion af temperatur

### 4.1.2 Iltforbrug fisk

Fiskens iltforbrug er sammensat af iltforbrug ved fysiske aktivitet og metabolisk iltforbrug. Både den fysiske og den metaboliske aktivitet stiger med temperaturen

Ifølge arbejdsrapport fra DMU<sup>2</sup> har regnbueørreder et gennemsnitligt iltforbrug på 312 mg ilt / time pr kg biomasse. Ved en daglig udfodring på 1% svarer det teoretiske iltforbrug til 312 g ilt pr kg foder. I praksis anvendes en højere værdi i dimensionering for at indbygge en sikkerhedsmargin.

Fiskens iltforbrug er afhængigt af fiskens fysiske og fiskens basale respiration, hvor begge stiger med temperaturen. Fiskens fysiske aktivitet varierer over døgnet og topper ved fodring hvor fiskene ”kæmper” om føden. Derudover har anlægsspecifikke forhold som strømningsforhold i opdrætsenheder også en vis indflydelse.

Fiskens iltforbrug varierer med foderstanden. En sultet fisk har det laveste iltforbrug og en fisk fodret til mætning har det højeste iltforbrug. Ved fodring af fiskene opserveres et forhøjet iltforbrug i en periode på et par timer efter fodring.

### 4.1.3 Design parametre.

I forbindelse med renovering eller anlæg af dambrug dimensioneres belufts- og rensningskapaciteten ud fra den maksimale tilladte udfodring. (Evt. forventede maksimale udfodring efter foderopskrivninger. For at have en tilpas sikkerhedsmargin anvendes en værdi på 500g ilt pr kg daglig udfodring.

- Iltforbrug fisk 300 - 500g ilt pr kg foder
- Iltforbrug biofilter 100 - 200g pr kg foder.
- CO<sub>2</sub> produktion på til 1,4 kg pr kg foder

### 4.1.4 Biofilter

Omsætning af organisk stof og kvælstofforbindelser i biofilteret kræver ilt. For at sikre en god og stabil omsætning skal iltindholdet holdes på et stabilt højt niveau. Biofilterets omsætning og iltforbrug er afhængigt af tilgængeligt næringsstof/substrat. Iltforbruget er derfor højest i en periode efter fiskene bliver fodret.

Målinger foretaget på modeldambrug viser at iltindholdet i vandet falder med omkring 2-4 mg / l ved passage gennem biofilteret. For at de nitrificerende bakterier kan omsætte ammonium kræves et iltindhold på minimum på 2 mg/l. For at processen forløber optimalt kræves 6-10 mg / l for filtre med fast medie, mens filtre med bevægeligt medie kan klare sig med en lavere iltkoncentration.

Det maksimale iltforbrug for et givent produktionsafsnit er omkring fodring. Her topper fiskenes fysiske aktivitet samtidigt med at fisken behøver en del ilt til fordøjelse og omsætning af fodret. I forbindelse med fiskens omsætning af foderet frigives opløst og partikulært materiale (fækalier) samt ammonium. Disse stoffer omsættes under iltforbrug i biofilter.

---

<sup>2</sup> DMU arbejdsrapport nr. 183: ”Modeldambrug, specifikationer og godkendelseskrav. Rapport fra faglig arbejdsgruppe.”

Opdrætsanlæggets minimale iltforbrug er estimeret til at være 6-10 timer efter fodring hvor fiskens fysiske aktivitet er på sit laveste, fodret er blevet omsat og biofilteret har opbrugt tilgængeligt substrat.

#### 4.1.5 Dækning af fiskenes iltbehov

Ved anvendelse af ekstern iltning af vandet er det nødvendigt at kende temperaturen og den initiale iltkoncentration i vandet. Derfra kan den nødvendige vandudskiftning beregnes.

#### 4.1.6 Tilgængeligt iltindhold i vand

Tabel 2 viser tilgængelig ilt i vandet målt i mg/l ved en given temperatur og iltmætning ved ind og udløb. 90 % iltmætning ved indløb / 80, 70, 60, 50, og 0 ved udløb. Ved et iltindhold på under 70 % i udløb observeres en reduktion i foderkvotienten på henholdsvis 19 % ved 60 % iltmætning og 44% ved en iltmætning på 50 %. Det vil sige, at ved lavere iltprocent udnyttes foderet væsentligt ringere. Iltprocenter på 50% og derunder er meget kritisk for både produktion og driftsøkonomi og medfører en akut risiko for fiskedød.

**Tabel 2 Viser tilgængeligt ilt i vandet ved en indløbsmætning på 90% og en udløbskoncentration på 80%, 70%, 60%, 50% og 0%**

	FQ 100%	FQ -19%	FQ -44%		
Tilgængelig ilt i vandet ved en given indløbs og udløbskoncentration					
oC	90 / 80	90 / 70	90 / 60	90 / 50	90 / 0
0	1,46	2,92	4,38	5,84	13,68
5	1,28	2,56	3,84	5,12	11,97
10	1,13	2,26	3,39	4,52	10,53
15	1,01	2,02	3,03	4,04	9,45
20	0,91	1,82	2,73	3,64	8,46
25	0,82	1,64	2,46	3,28	7,74
40	0,64	1,28	1,92	2,56	6,03

Den nødvendige vandudskiftning for at dække fiskenes behov for ilt kan beregnes ud fra iltindholdet i det tilførte vand samt det ønskede iltindhold i udløbsvandet (70% for optimal drift).

Tabel 3 viser beregnede krav til friskvandsforsyning ved en stående bestand på 40 ton fisk samt en daglig udfodring på 1 %.

Iltbehovet kan beregnes ved anvendelse af tal for fiskenes iltforbrug:

- Iltforbrug i mg = (312 mg til 500 mg) ilt pr time \* biomasse i kg



Vandudskiftningen beregnes ud fra tilgængeligt ilt i vandet ved det ønskede iltindhold i ind og udløb.

**Tabel 3 Vandforsyning påkrævet til forsyning af fiskene med ilt ved en indgangsmætning på 90 %**

°C	Vandudskiftning krævet l / sek. ved et iltforbrug på 312 mg / kg				Vandudskiftning krævet l / sek. ved et iltforbrug på 500 mg / kg			
	Udløb 80%	Udløb 70%	Udløb 60%	Udløb 50%	Udløb 80%	Udløb 70%	Udløb 60%	Udløb 50%
0	2374	1187	791	594	3805	1903	1268	951
5	2708	1354	903	677	4340	2170	1447	1085
10	3068	1534	1023	767	4916	2458	1639	1229
15	3432	1716	1144	858	5501	2750	1834	1375
20	3810	1905	1270	952	6105	3053	2035	1526
25	4228	2114	1409	1057	6775	3388	2258	1694
40	5417	2708	1806	1354	8681	4340	2894	2170

### Iltindhold i atmosfærisk luft

Atmosfærisk luft indeholder omkring  $\frac{1}{2}$  mg  $O_2$  / l.

Beregning af den teoretiske luftmængde der skal til for at forsyne 1000 kg fisk med ilt ved en udnyttelses procent på 20 i den valgte diffusor løsning.

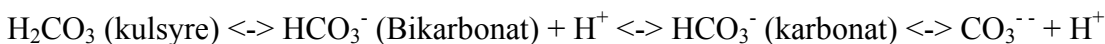
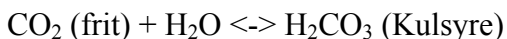
$$1000 \text{ kg} * 312 \text{ mg ilt/kg/time} / (261 \text{ mgO}_2/\text{l} * 0,05) = 23.908 \text{ l luft / time}$$

$$1000 \text{ kg} * 500 \text{ mg ilt /kg/time} / (261 \text{ mgO}_2/\text{l} * 0,05) = 38.314 \text{ l luft / time}$$

## 4.2 $CO_2$ ;

$CO_2$  opløst i vand indgår i bikarbonatsystemet hvor  $CO_2$  reagerer med vandet og danner kulsyre, bikarbonat og karbonat, alt afhængigt af vandets pH samt indhold af calcium og magnesium. En del af det totale  $CO_2$  i vandet kan findes som frit  $CO_2$ , resten vil ligge i form af kulsyre samt bikarbonat og karbonat.

### 4.2.7 Bicarbonat system



Vandets pH værdi kan trække systemet i begge retninger jo mere basisk vandet er (høj pH) jo mere  $CO_2$  vil findes i form af karbonater. Bikarbonat systemer er et buffer system der er med til at stabilisere pH værdien

Ved beluftning kan kun den del af den totale  $CO_2$  der findes som frit  $CO_2$  afgasses. Ved afgang forskubbes balancen i systemet og der vil omdannes kulsyre til frit  $CO_2$ . Reaktionshastigheden mellem kulsyre og frit  $CO_2$  er forholdsvis langsom og vil derfor være den "styrende" i afgasningsprocessen.

### **4.3 Kvælstof:**

Frit kvælstof  $N_2$  vil normalt ikke være noget problem. Kvælstofovermætning kan forekomme i forbindelse med indtag af vand fra (dyb) boring. I recirkulerede systemer vil der være en vis produktion af frit kvælstof i biofiltre der kan resultere i gasovermætning. Overmætning med kvælstof kan være skadeligt for fiskene da det kan give dem dykkersyge.

## 5 Teoretisk beskrivelse af de anvendte principper for beluftning

Fiskene er afhængige af den ilt der bliver bragt frem til dem i vandet. Det er derfor vigtigt at opretholde et tilstrækkeligt indhold af opløst ilt i vandet. Ved stigende grad af genanvendelse af vand stiger behovet for tilførsel af ilt til vandet for at forsyne fiskene. Samtidigt med at fisken forbruger ilt producerer den CO<sub>2</sub> der udskilles til vandet over gællerne. Ved intensivt opdræt er det nødvendigt både at ilte vandet samt fjerne det producerede CO<sub>2</sub>.

Begge behov indfries typisk ved beluftning af vandet.

I det følgende gennemgås teoretiske overvejelser omkring iltning og afgangning for på den måde at finde frem til, hvilke parametre der er styrende for effektiviteten af disse processer.

### Ligevægt med atmosfærisk luft ved 10 grader

Alle gasser opløst i vand befinder sig i en ligevægt situation. Ligevægten mellem gasser i atmosfæren og vand ved 10 grader.

O <sub>2</sub>	157 mm Hg (261 mg /l)	O <sub>2</sub>	11,3 mg /l
N <sub>2</sub>	586 mm Hg (974 mg /l)	N <sub>2</sub>	17,7 mg /l
CO <sub>2</sub>	0,25 mm Hg (0,62 mg /l)	CO <sub>2</sub>	0,77 mg /l

Henrys lov beskriver mætnings koncentrationen for en given gas ved et givent tryk. Ved at hæve partialtrykket for en given gas, hæves mætnings koncentrationen samtidigt.

Formler i dette afsnit er hentet fra rapporten: Rens –Tek (kapitel 6) udgivet i samarbejde med DHI, Dansk Akvakultur mfl.

$$\kappa_{H,pc} = \frac{P_{gas}}{c_{aq}}$$

Hvor

$\kappa_{H,pc}$  er henrys konstant for en given gas,  $p_{gas}$  er partialgastrykket og  $C_{aq}$  er koncentrationen i vandet.

### Ficks lov (Gasoverførselshastigheden)

Hastigheden hvormed en gas overføres til en væske og omvendt er afhængigt af grænsefladearealet mellem de to faser samt differencen mellem den aktuelle koncentration  $c_{akt}$  og mætningskoncentrationen  $c_{mæt}$ .

$$\frac{dc_{opløst}}{dt} = K_L \cdot a \cdot (c_{mæt} - c_{akt})$$

Hvor

$a [m^{-1}]$  er forholdet mellem grænsefladareal og systemvolumen

$K_L$  Masseoverførselskoefficienten udtrykt som modstanden mellem over væskesiden ( $k_L$ ) og gassiden ( $k_G$ ) over grænsefladen:

$$\frac{1}{K_L} = \frac{1}{\kappa_H^u \cdot k_G} + \frac{1}{k_L}$$

Hvor

$\kappa_H^u$  er den dimensionsløse Henry's konstant for gassen givet ved:  $\kappa_H^u = \frac{c_{aq}}{c_{gas}}$

Den specifikke iltningsskapacitet  $IK / P$  er relateret til  $K_L$

$$\frac{IK}{P} = K_L \cdot a \cdot c_{m\ddot{a}t} \cdot \frac{V}{p} = K_L \cdot A \cdot \frac{c_{m\ddot{a}t}}{p}$$

$IK$  iltningsskapaciteten [kgO<sub>2</sub>/h]  $P$  effektforbrug kWh/h

### 5.1.2 Opsummering

Henry's lov viser, at:

- Gassers opløselighed – og dermed mætningskoncentrationen - stiger med trykket. Det vil i praksis sige, at vand under tryk / dybt vand kan indeholde mere ilt og samtidig mere CO<sub>2</sub> end ved overfladen.

Fick's lov viser, at:

- Jo større kontaktflade der er imellem gas- og vandfase, jo hurtigere kan gassen opløses i vandet
- Jo længere koncentrationen er under/over mætningskoncentrationen i vandfasen, jo hurtigere kan gassen opløses/afgasses

Dette giver anledning til i det videre forløb at fokusere på:

- Indblæsningsdybde
- Boblestørrelser
- Kontakttid mellem bobler og vand dvs. opstigningshastighed

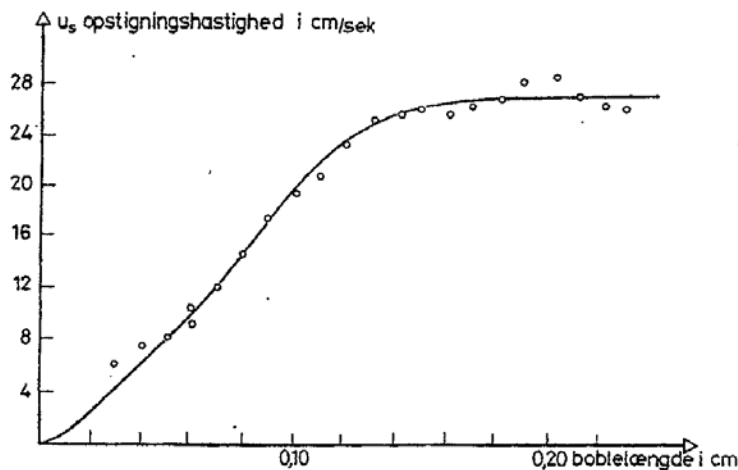
### 5.1.3 Teori om boblestørrelse og –opstigningshastighed

Generelt i dette afsnit refereres til: Teoretisk vandhygiejne, P Harremoës, polyteknisk boghandel.

Kort resume kap. 6 Luftning

#### ***Boblernes opstigningshastighed***

*Fra afsnit 6.6 boblebeluftning: Dimensionsanalyse*



Figur 8 Boblernes opstigningshastighed

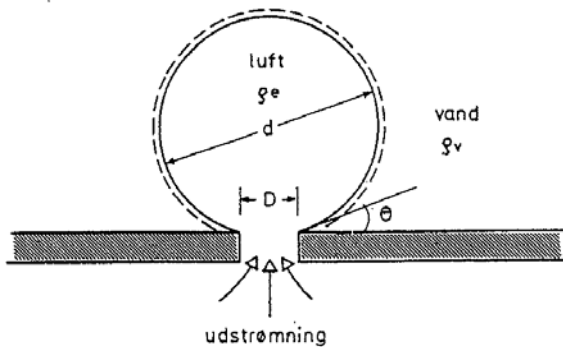
*Boblernes opstigningshastighed er opgivet til konstant = 26 cm/s for boblediameter større end 1,5mm. Diagrammet går kun op til en boblediameter på 2,4mm. Dette resultat gælder enkelbobler der stiger op i en stillestående vandmasse.*

I det virkelige dambrug forventes det at en koncentreret tilførsel luft/bobler over et mindre felt (eks. 10 cm\* 10 cm) vil genere en opstigende vandstrøm, hvilket bevirker at boblehastigheden på 26 cm/s vil blive forøget. En opstigningshastighed på 26 cm/s svarer til en kontakttid på 4 s hvis diffusoren er placeret 1m under overfladen.

Det må forventes, at hvis der bobles over hele bassinbunden, så vil den kraftige opadgående vandstrøm formentlig stoppes, da vandstrømmen fremkommer af forskelle af massefylden mellem zoner lige over boblefeltet og zoner uden for boblefeltet som derved skaber en trykforskel.

**Bobledannelse.**

Ved bobledannelse skelnes der mellem 3 kategorier: 1. Enkeltbobler 2. kædebobler 3. Jetudstrømning. For et givet hul vil bobledannelsen skifte fra kategori 1 over 2 til 3 med øget luftudstrømning. Ved kædebobler sker bobledannelsen så hurtigt, at en ny boble i dannelsesprocessen indhenter den foregående og smelter sammen med denne og danner en ny større boble. Ved jetudstrømning vil enkelte bobler løsrive sig fra jetstrømmen på en tilfældig måde på grund af turbulens og opdrift. Dette giver bobler af meget varierende størrelse.

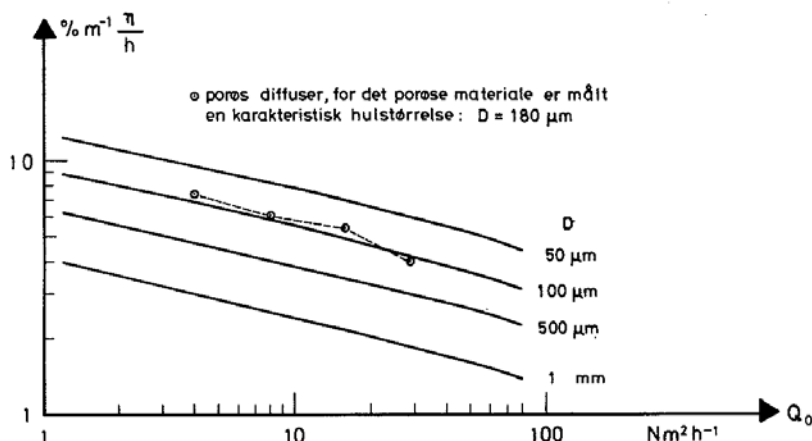


**Figur 9 Bobledannelse**

Dannelsen af enkeltbobler styres af balancen mellem opdriften på boblen og overfladespændings fastholden af boblen omkring hullet. Dette er illustreret på Figur 9

Ud fra formel 6.38 af "teoretisk vandhygiejne" konkluderes der at boblediameteren er uafhængig af udstrømningshastigheden

Figur 10 taget fra "Teoretisk vandhygiejne" viser at en lille hulstørrelse under 1 mm aftagende til 1/20 mm har en forbedret iltningseffektivitet på ca. 3 gange.



**Figur 10** Iltningseffektiviten pr. m neddykning vist som funktion af luftindblæsningen i N m<sup>3</sup>lb. M bassin og pr time.

Laboratorieforsøgene viste senere at de anvendte storbobleteknik giver bobler på mindst 2 x 4 mm og større. Der skal derfor anvendes en anden teknik til at frembringe meget små bobler.

Teorien om bobler foranlediger at fokusere på boblestørrelser og opstigningshastighed. Dermed er det relevant at kigge på de teknikker der ligger bag skabelsen af boblerne og dvs.:

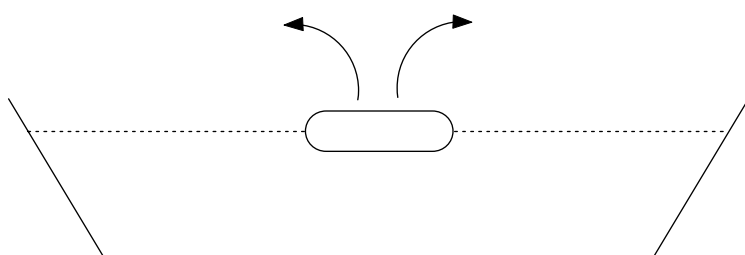
- Udformning af diffusorer – herunder hulstørrelser
- Opstigningshastigheder – herunder boblestørrelser og luftmængder

## 6 Anvendte teknologier og principper til iltning / beluftning

For at skabe tilstrækkeligt overfladeareal og kontakttid mellem gas og vandfase anvendes der forskellige teknologier på dambrug.

### 6.1 Overfladebeluftere (Hjulpiskere)

Overfladebeluftere anvendes oftest på traditionelle dambrug. Hjulpiskeren slynger vand op i luften der skaber en stor kontaktflade med luften, desuden bliver der skabe en vis omrøring i dammen. Hjulpiskere er ikke særlig gode til at skabe en høj iltkoncentration i dammen, men er derimod effektive til at ”holde fiskene i live” under forhold med et lavt iltindhold i vandet.



Figur 11 Overfladebelufter i en dam

#### Iltning

Overfladebelufteren er god ved lave iltkoncentrationer i damme. Ved iltmætninger op omkring 50% er effekten meget høj. Effekten aftager dog hurtigt og en overfladebelufter kan sjældent opilte vandet højere end til en iltmætning på ca. 70 %.

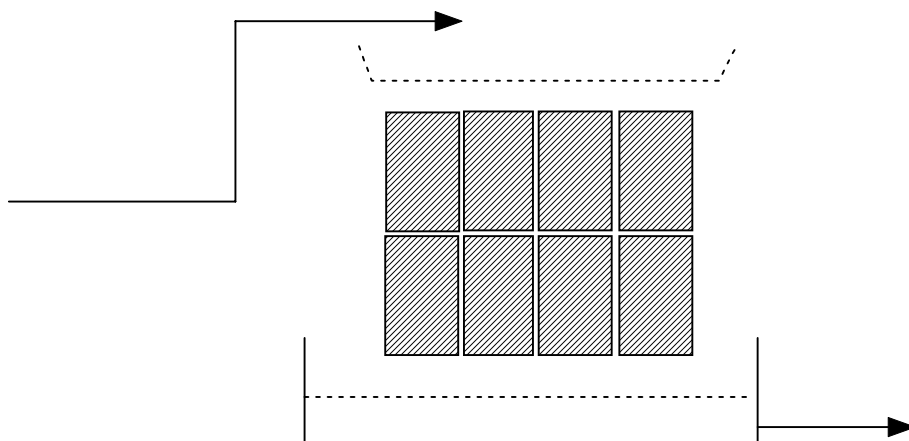
#### Afgasning

Generelt en god afgasningseffekt. Anvendes typisk på traditionelle dambrug til afgasning af åvand. Udover afgasning af åvand er det ikke særlig relevant at afgasse vandet på traditionelle dambrug grundet den lave recirkuleringsgrad og dermed risiko for gasovermætning.

### 6.2 Rislefilter

Rislefiltre anvendes i både intensive og ekstensive anlæg. Rislefiltre fungerer ved at vand pumpes op over en fordeler rist der er placeret øverst i filteret. Derefter løbe vandet ned gennem et dertil egnet filtermateriale. I risle filtre opnås en stor kontaktflade samt en lang kontakt tid. I et korrekt opbygget rislefilter vil vandet trække frisk luft med sig gennem filteret og dermed opnå en ekstra effektivitet. Et rislefilter kan desuden forsynes med tvungen udluftning hvilket gør filteret mere effektivt specielt med hensyn til afgasning. Det der koster energi i rislefilteret er, at vandet skal løftes op til toppen af filteret med en løftehøjde på 80 + 40 cm, og det koster pumpeenergi.





Figur 12 Principdiagram over risefilter

### Iltning

Effektiv opiltning af vand til en iltmætning på omkring 90 - 95 %

### Afgasning

God afgasning grundet lang kontakttid samt lave ”drifttryk”

## 6.3 Beluftning med luft under tryk

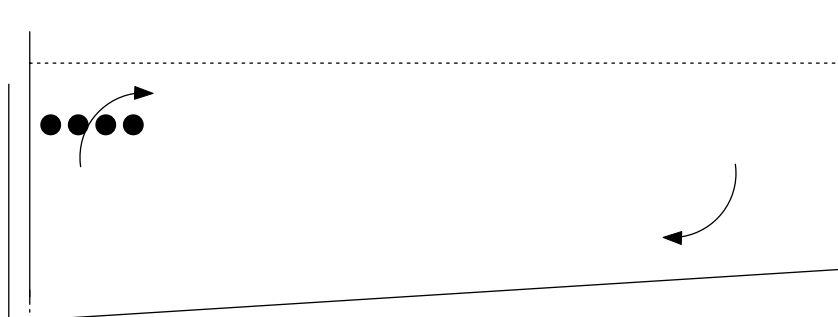
Inden for erhvervet anvendes en lang række forskellige løsninger til beluftning af damme / kummer og kanaler ved hjælp af luft under tryk. For at opnå så stort et overfladeareal som muligt mellem vand og luftfasen kræves diffusorer til at skabe luftbobler. Luftboblernes størrelse er primært afhængigt af hulstørrelsen i diffusoren. Mindre huller giver mindre bobler, samtidigt med at modtrykket stiger. Valg og design af diffusorer vil altid være en balancegang mellem boblestørrelse og modtryk.

### 6.3.1 Blæsertyper

- Blæsere (Radialblæsere) dvs. turboblæsere, som er effektive ved lavt modtryk
- Kapselblæsere (Fortrængning) Konstant luft ved moderat modtryk

### 6.3.2 Lavtryksdiffusorer

En lavtryksdiffusor er en diffusor løsning med lavt modtryk placeret ved en forholdsvis lav vanddybde (omkring 80 cm). Lavtryks diffusorer kan bestå af mange difuserrør monteret på en ramme. Lavtryksdiffusoren er forholdsvis pladskrævende. Denne konstruktion samt den lave vanddybde giver et lavt modtryk og der kan derfor anvendes blæsertyper (turboblæsere) der er effektive ved lave modtryk set i forhold til kapselblæsere. Under drift kræver lavtryksdiffusoren en luftmængde på ca. 66 m<sup>3</sup> time pr. m<sup>2</sup> af dens vandrette overfladeareal, ifølge Christian Jørgensen Aps.



Figur 13 Principdiagram over en lavtryks diffusor placeret i en kumme

### Iltning

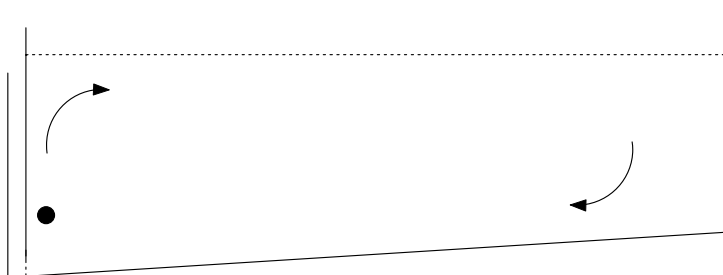
Iltningen ved lave iltmætninger er god. Lavtryksdiffusoren kan eventuelt være mindre effektiv ved høje iltmætninger (over 80 %) grundet den lave indblæsningsdybde.

### Afgasning

Grundet den lave vanddybde er der ingen risiko for at tilføre vandet kvælstof. Generelt er lavtryks diffusoren god til at afgasse vandet grundet den lave indblæsningsdybde og store luftmængde.

### 6.3.3 Kummebeluftere

Kummebeluftere kan udformes som en simpel diffusor der er placeret omkring 50 cm over bunden i en opdrætskumme med en tilstrækkelig vanddybde. For at skabe cirkulation i kummen placeres diffusoren op ad en væg der tvinger det stigende vand ud i kummen. Det er vigtigt at forholdet mellem dybde og længde af kummen passer for at opnå den ønskede cirkulation. Ved anvendelse af kummebeluftere kan friskvandsforsyningen reduceres da fiskene i kummen til en vis grad forsynes med ilt fra diffusoren.



Figur 14 Principdiagram af kummebelufter

### Iltning:

God iltning i kummen, giver mulighed for regulering af den tilsatte luft / iltmængde ud fra behov.

### Afgasning

Det vides ikke hvor stor afgasningen er men må forventes at ligge på samme niveau som ved en mammutpumpe fordi luftmængder, diffusordesign og indblæsningsdybde er sammenlignelige.

### 6.3.4 Mammutpumpe / Airlift

Mammutpumpen / airliften, belufter og pumper vandet. Mammutpumpen består af en brønd eller fordybning, hvori der er placeret en skillevæg. På den ene side af væggen er der installeret et antal diffusorer. Den drivende kraft i en mammutpumpe er vægtfyldedifferensen på vand og luft/vand siden. Den maksimale løftehøjde er bestemt af udformningen af pumpen da dette giver evnen til at styre luftstrømmen (undgå kollaps). Optimal løftehøjde for mammutpumper med den udformning der anvendes i modeldambrug:

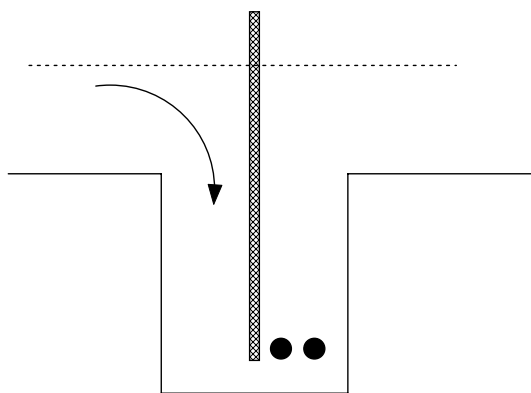
ved 2m vanddybde 10cm

ved 4m vanddybde 20cm

Set isoleret som belufter eller som pumpe er mammutpumpen ikke særlig effektiv. Den store fordel ved en mammutpumpe er at den er meget driftsikker, samtidigt med at den er billig at anlægge og ikke kræver meget plads. En vigtig faktor er at der kan etableres et billigt og effektivt nødbeluftningssystem når hele dambruget drives af luft.

Der anvendes i erhvervet både 2 og 4 meter dybe brønde alt afhængigt af dambruget, ved de fleste nybyggerier anvendes dog oftest 2 m varianten. Ved modeldambrug anvendes mammutpumper mest som strømsætter med en løftehøjde på ca. 10cm.

Ved indløb i mammutpumpe 60-70 % iltmætning  
 Ved udløb fra mammutpumpe 80-95 % iltmætning  
 Mammutpumpen arbejder med 10cm løftehøjde



Figur 15 Princip diagram af mammut pumpe anvendt på dambrug

#### Iltning

Ved anvendelse af mammutpumper opserveres der på modeldambrug en opiltning fra omkring 65-70 % iltmætning til 90 – 95 % iltmætning ved passage.

#### Afgasning

I de fleste tilfælde er afgasningen fra mammut pumper tilstrækkelig ud fra den viden om opløste gasser der er tilgængelig i dag. Grundet det større drifttryk er afgasningen ikke så effektiv som ved anvendelse af et rislefilter specielt ved 4 m dybe mammutpumper.

## 6.4 Teori

Mammutpumpens effekt er afhængig af den neddykkede længde  $H_s$  [mm] i forhold til den geodætiske løftehøjde  $H_{geo}$  [mm], som er afstanden mellem vandspejl og luft/vandafgang, se Figur 16<sup>3</sup>.

Neddykningsforholdet E:

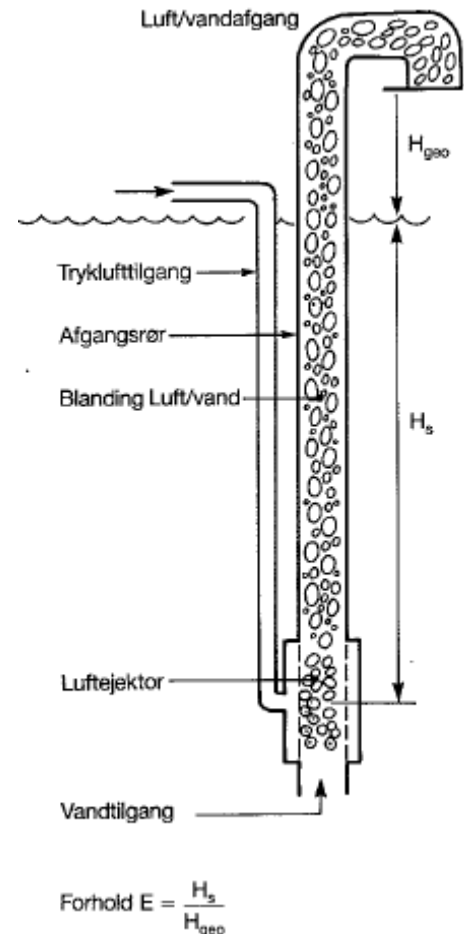
$$E = H_s / H_{geo} [-]$$

I Kølkær findes den geodætiske løftehøjde ved at sætte et rør ned i boblezonen og derved kan den statiske løftehøjde findes. Differensen mellem den statiske løftehøjde og vandspejlet ved indløbet er dermed den geodætiske løftehøjde.

En vigtig faktor er lufthastigheden. Under transporten har vandet en hastighed  $V_v$  og luften  $V_l$ . Afhængig af neddykningsforholdet og diameteren af stighøjden / dimensionerne af gruben kan lufthastigheden blive større end vandhastigheden. Jo større forskel der på  $V_v$  og  $V_l$ , jo dårligere bliver totalvirkningsgraden. Ifølge pumpeståbiens udg. 3 har forsøg vist at friktionstab bliver 6 – 12 gange større med luft/vand blanding end med vand alene. For at få den bedste virkningsgrad skal neddykningsforholdet E ligge mellem 2-2,25. Den maksimale virkningsgrad ligger på 40 %. Ved et neddykningsforhold på 0,5 – 0,1 vil virkningsgraden ligge på 5 – 20 procent. Vandhastigheden i stigrør / grube bør aldrig være større end 1,5 m/s og lufthastigheden ikke over 10 m/s.

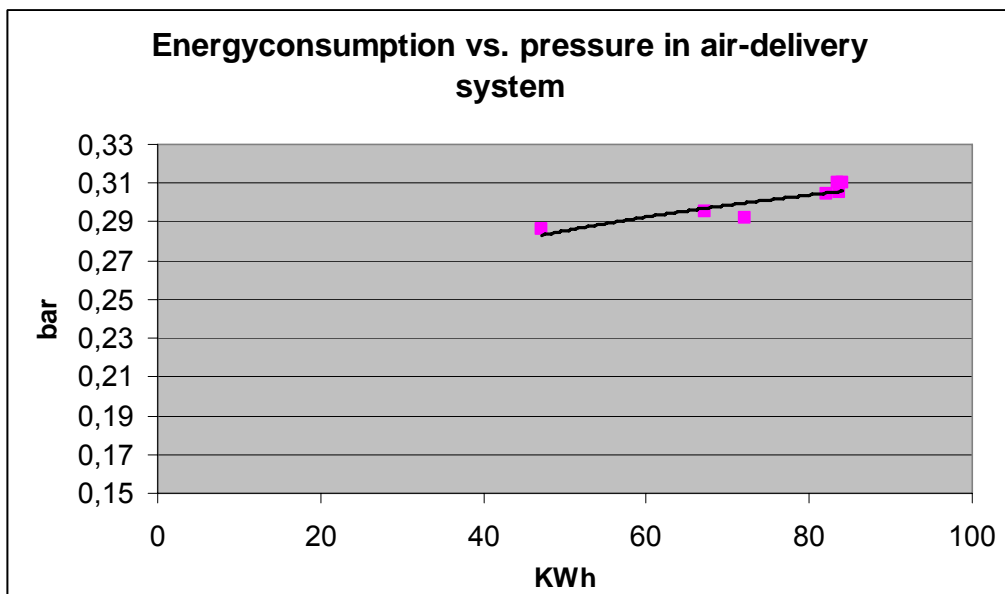
DFU har gennemført undersøgelser af mammutpumper i forbindelse med modeldambrugsprojekt samt i forbindelse med EU projektet "Sustain Aqua". Her er der målt på Nørå Dambrug, der er opbygget som et kanalanlæg med 6 mammutpumper drevet af kapselblæsere. Som det ses af Figur 17 øges trykket med et øget energiforbrug, men virkningen er begrænset set i forhold til den store stigning i energiforbruget.

På Figur 18 ses betydning af at mammutpumpen bliver forsynet med en korrekt mængde luft, da den praktisk talt kollapser ved for store luftmængder.

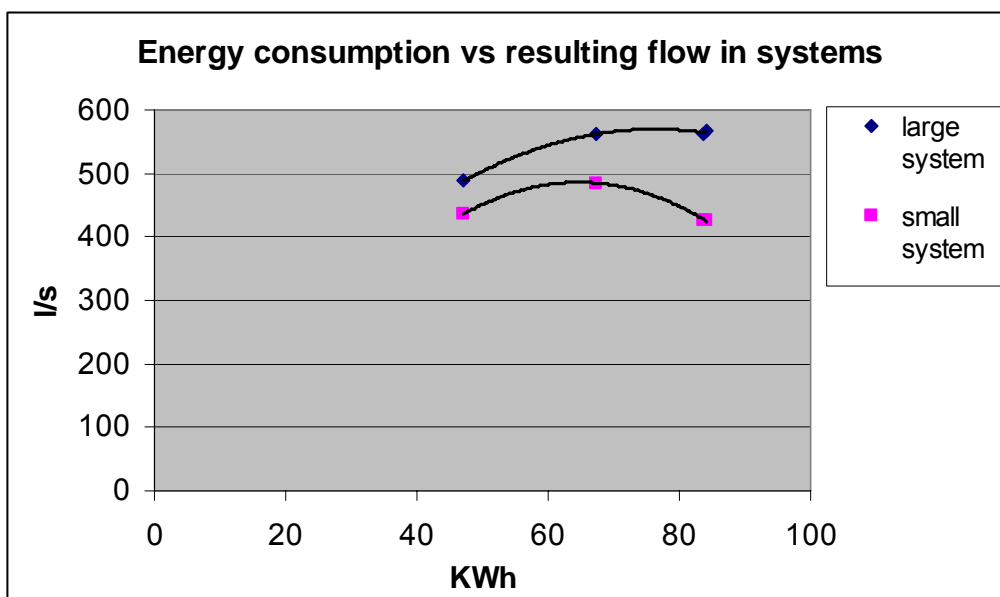


Figur 16 Principdiagram af mammutpumpe

<sup>3</sup> Pumpeståbi, 3 udgave, 7.4 mammutpumper. Anders Borup med flere



Figur 17: Energiforbrug i forhold til opnået tryk i kapselblæsere, Nørå dambrug



Figur 18: Energiforbrug i forhold til resulterende flow, Nørå dambrug

#### 6.4.5 Ren ilt

Anvendelsen af ren ilt på danske dambrug er forholdsvis begrænset, en af grundene hertil er at ren ilt er dyrt med priser på omkring 1,7 kr pr. kg for ilten alene. Derudover kommer de andre omkostninger forbundet med opbevaring og indløsning. Ilt anvendes primært under transport af fisk samt til nødbeluftning. På nogle dambrug suppleres den øvrige beluftning med ilt under forhold hvor denne ikke er tilstrækkelig.

Ved brug af ren ilt samt en fin diffusor opnås et partialtryk af ilt der er 5 gange højere end ved brug af atmosfærisk luft og derved er det muligt at overmætte vandet med ilt.

### **Iltning**

Meget god, ved anvendelse af ren ilt til gennembobling af vand kan man teoretisk set komme op på en iltmætning på 500%.

### **Afgasning**

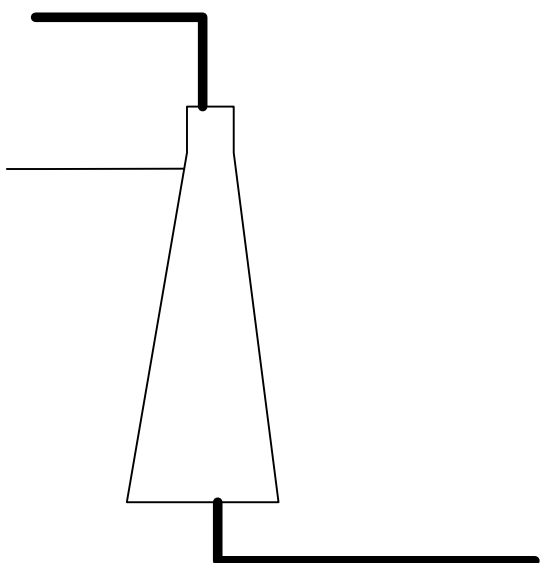
Ved ”beluftning” med ren ilt er afgasningen af vandet meget god da man vil opleve et partialgastryk på 0 for de gasser der ønskes afgasset. I praksis vil afgasningen være begrænset da man ikke ønsker at der undslipper uopløst ilt fra processen

### **6.4.6 Iltkegler**

Iltkegler anvendes oftest på ålebrug, samt på dambrug i de situationer hvor det ikke er muligt at opnå en tilstrækkelig iltkoncentration med ”konventionelle” beluftnings-teknologier. Iltkegler fungerer ved at vand sættes under tryk ved hjælp af en trykpumpe og ren ilt tilsættes øverst i iltkeglen.

Vandhastigheden falder under gennemløbet i iltkeglen og derved forhindres uopløst ilt i at blive ”skyllet ud” Ved brug af ren ilt og en ilt kegle er det muligt at opnå en høj iltovermætning på flere hundrede procent.

Omkostningerne ved brug af ilt kegler er forholdsvis høje, da det kræver en del energi at opnå det ønskede driftstryk dertil kommer omkostningerne til ilt.



**Figur 19** Principdiagram af en iltkegle

### **Iltning**

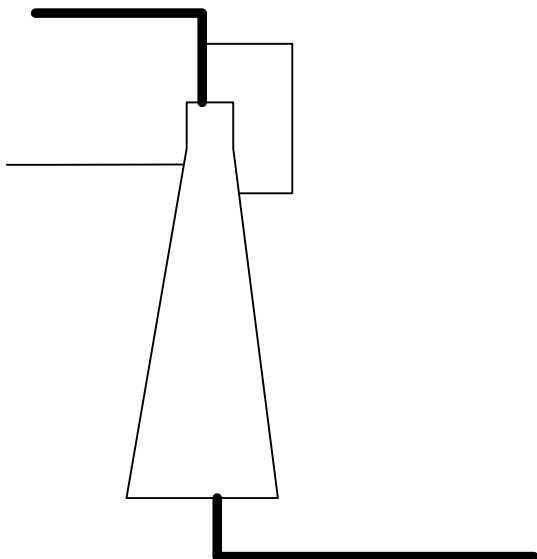
Meget god iltning ved anvendelse af iltkegler kan ilt mætninger på over 1000 % opnås. Ved anvendelse af iltkegler indløses 90-95 % af den tilsatte ilt

### **Afgasning**

I praksis ingen afgasning da man ønsker af undgå spild af ilt

### 6.4.7 ReOx

ReOx princippet er en forfining af iltkeglen. Uopløst ilt føres tilbage til indgangsvandet ved brug af en ejektorpumpe monteret i tilløbsrøret. ReOx princippet kræver højere driftryk og flow end hvad der normalt anvendes. Ved anvendelse af ReOx udnyttes den tilsatte ilt bedre, på bekostning af et højere energiforbrug.



Figur 20 Principdiagram af en ReOx iltkegle

#### Iltning

God iltning ved anvendelse af iltkegle kan en iltovermætning på 1000 % opnås. Ved anvendelse af ReOx reduceres spild af ilt fra processen.

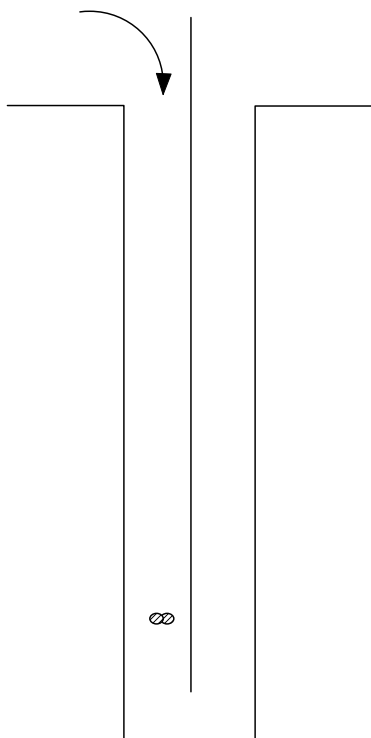
#### Afgasning

Ingen afgasning

### 6.4.8 U rør / Deep Shaft

En deep-shaft er en dyb brønd, der virker efter samme princip som en iltkegle hvor ren ilt tilsættes til vandet under tryk. Det kræver stort set ingen energi at operere en deep-shaft, da driftrykket opstår som følge af vanddybden. Den eneste energi processen kræver, er den energi der skal til for at overvinde tryktab i brønden som følge af friktion.

I Danmark har det været svært at få tilladelse til anlæggelse af en deep-shaft, grundet frygt for udsivning af dambrugsvand til grundvand. Desuden er deep-shaften kostbar at etablere.



**Figur 21** Principdiagram af en Deep-shaft / U-Rør

### **Iltning**

God iltning, i teorien kan en Deep-shaft indløse tæt ved 100 % ilt uden energiforbrug til trykpumper.

### **Afgasning**

Ingen afgasning



## 7 Nøgletal og benchmarking

Formålet med dette kapitel er at sammenligne dambrugenes energinøgletal på baggrund af en række andre informationer, som forventes at have indflydelse på energiforbruget.

### 7.1.1 Metode

I den første del af projektet blev der gennemført en kortlægning af alle de deltagende dambrug og ålebrug. På baggrund af den viden, som Dansk Akvakultur og Lokalenergi havde om henholdsvis anlæg til fiskeopdræt og energiforbrugende udstyr, blev der udarbejdet en tjekliste.

Tjekliste til brug ved kortlægning af dambrug og ålebrug:

Hygild Dambrug			
Jorddamme:	ja <input type="checkbox"/>	nej <input type="checkbox"/>	
Betondamme:	ja <input type="checkbox"/>	nej <input type="checkbox"/>	
Raceways:	ja <input type="checkbox"/>	nej <input type="checkbox"/>	opholdstid: _____ timer
Returpumpning:	ja <input type="checkbox"/>	nej <input type="checkbox"/>	recirkuleringsgrad: _____ %
Lagune:	ja <input type="checkbox"/>	nej <input type="checkbox"/>	areal: _____ m <sup>2</sup>
	opholdstid: _____ timer		
Behlftning:	Brønd <input type="checkbox"/>	dybde: _____	Rislefilter <input type="checkbox"/> Andet: _____
Kegler:	antal: _____		tømmes (hyppighed): _____
Sigte:	ja <input type="checkbox"/>	nej <input type="checkbox"/>	type: _____
Kontaktfilter:	ja <input type="checkbox"/>	nej <input type="checkbox"/>	type: _____
Biofilter:	ja <input type="checkbox"/>	nej <input type="checkbox"/>	type: _____ størrelse _____ m <sup>2</sup>
	opholdstid: _____ timer		
Slamdepot:	størrelse: _____		opholdstid: _____ timer
Volumen i produktionsareal:	_____ m <sup>3</sup>		
Vandindtag:	_____ l/s		Internt vandflow: _____ l/s
Stående bestand:	_____ tons fisk		Fisketæthed: _____ kg/m <sup>3</sup>
Årligt foderforbrug:	_____ tons		Foderkvotient: _____ kg foder pr. kg. fisk
Daglig udfodring:	_____ % af stående bestand		
Fodertype:	_____	Protein: _____	Fedt: _____
Pumper:			
Pumpe:	_____ Type: _____	Størrelse: _____	Effekt: _____
Pumpe:	_____ Type: _____	Størrelse: _____	Effekt: _____
Pumpe:	_____ Type: _____	Størrelse: _____	Effekt: _____
Pumpe:	_____ Type: _____	Størrelse: _____	Effekt: _____
Behlftning:			
Enhed:	_____ Type: _____	Størrelse: _____	Effekt: _____
Enhed:	_____ Type: _____	Størrelse: _____	Effekt: _____
Enhed:	_____ Type: _____	Størrelse: _____	Effekt: _____
Total energiforbrug:	el: _____	gas: _____	Andet: _____
Kommentarer:	_____		
	_____		
	_____		

Tjeklisten blev udfyldt i forbindelse med at alle de deltagende dambrug og ålebrug blev besøgt, og samtidig blev effektoptag på energiforbrugende udstyr målt. Nogle af oplysningerne viste sig ikke

at være relevante for alle, og fra nogle dambrug har det ikke været muligt at få alle oplysninger. Sammenfatningen af kortlægningen ses i det følgende.

**Table 4: Nøgletal for de dambrug og ålebrug som har deltaget i projektet**

	Ål/ørred	Princip	Årligt elforbrug, kWh	Årlig produktion, ton	Årligt forbrug af ilt, ton	Årligt foderforbrug, ton	Stående bestand af fisk, ton	Vandindtag, m <sup>3</sup> /h	Recirkuleringsgrad, %
Lyksvad	Ål	Recirkuleret åleopdræt	1.855.500	260	390	440	190	?	? ca. samme som Stensgaard
Stensgaard	Ål	Recirkuleret åleopdræt	2.368.974	270	341	437	170	8	97
Kongeåens	Ørred	Model 3 dambrug	1.800.000	1095		876	300	360	90
Hygild	Ørred	Traditionelt dambrug		192		150	75	2160	0
Abildvad	Ørred	Model 1 dambrug med model 3 teknologi	389.832	102		92	47	144	90
Kærhede	Ørred	Udenfor kategori			?				
Kølkjær	Ørred	Model 1 dambrug	600.000	239		215	85	792	80

**Tabel 5: Nøgletal for de dambrug og ålebrug som har deltaget i projektet**

	Iltnings-teknologi	Beluftning/afgasnings-teknologi	Flytning af vand	Volumen af produktions-bassiner, m <sup>3</sup>	Volumen af biofilter	Ei-nøgletal 1, kWh/ton fisk	Ei-nøgletal 2, kWh/ton foder	Observationer
Lyksvad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Iltkegler</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rislefiltre</li> <li>• Luftrør med diffusor i moving bed filtre</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cirkulations-pumper</li> <li>• trykpumper</li> </ul>	1.810		7.137	4.217	
Stensgaard	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Iltkegler</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rislefiltre</li> <li>• Luftrør med diffusor i moving bed filtre</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cirkulations-pumper</li> <li>• trykpumper</li> </ul>	2.500		8.774	5.421	
Kongeåens	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mammutpumper, 4 og 2 m. dybde</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mammutpumper, 4 og 2 m. dybde</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mammutpumpe, 4 og 2 m. dybde</li> <li>• pumpe fra vandboring</li> </ul>	8.500		1.644	2.055	"Store" bobler i biofilter
Hygild								
Abildvad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kummebeluftning i 1,8 m. dybde</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kummebeluftere</li> <li>• Diffusor efter biofilter</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• cirkulations-pumpe</li> </ul>	700		3.814	4.237	
Kærhede	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lavtryksdiffusorer 0,8 m. Dybde</li> <li>• mammutpumper</li> <li>• iltkegler</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lavtryksdiffusorer 0,8 m. dybde</li> <li>• mammutpumper</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mammutpumpe</li> <li>• Cirkulations-pumper</li> </ul>					
Kølkjær	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mammutpumper, 4 m. dybde</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mammutpumper, 4 m. dybde</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mammutpumpe, 4 m. dybde</li> </ul>	1.440		2.512	2.791	

### 7.1.2 Refleksion over nøgletal og benchmarking

Der er store forskelle på energinøgletallene, hvilket også er forventeligt, idet dambrugene er forskellige i opbygning og størrelse.

Åleproducenterne skiller sig en del ud fra ørreddambrugene både med hensyn til teknologivalg og energinøgletal. Forklaringerne på at energinøgletallene er højere for åleproducenterne end for ørreddambrugene:

1. Vandet i åleanlæggene er 25-27 °C, mens det i ørreddambrugene er ca. 10-15 °C. Iltopløseligheden i vand falder med stigende temperatur (se 4.1.1) samtidigt med at omsætningsraterne er langt højere. Derfor skal ilten indløses i vandet under højere tryk i åleanlæggene for at få tilstrækkeligt med ilt i vandet ved den højere temperatur, og det er en energikrævende proces.
2. Recirkuleringsgraden er væsentligt højere – som det også ses af nøgletallene - hvilket hænger sammen med at åleanlæggene typisk bruger boringsvand og således ikke vand fra en å. Recirkulering er energikrævende fordi vandet skal flyttes rundt i anlægget med pumper, og fordi det skal renses i biofilteret hvor der bruges energi til blæsere mm.
3. Foderkvotienten er væsentligt højere i et åleanlæg end i et ørreddambrug. Hvor ørreddambrugene typisk har en foderkvotient på 0,8 – 0,9 kg foder per kg fisk har åleanlæggene typisk en foderkvotient på 1,6 – 1,8 kg foder pr. kg. fisk. Det betyder at produktionsbidraget er højere, samt at en større del af foderet i åleanlæggene kommer ud som fiske-afføring og opløste stoffer som skal omsættes i biofilteret. Og den ekstra omsætning i biofilteret kræver ekstra energi til beluftning.
4. Ørreddambrugene kan i nogen udstrækning benytte sig af tyngekraften til at flytte vand via opstemningen og faldet i å-løbet. I åleanlæggene skal alt vandet flyttes mekanisk rundt ved hjælp af pumper.

De to åleanlæg, som er med i projektet, er bygget op efter samme princip, og der er således ikke noget i designet af anlægget, som kan forklare forskellen i energinøgletal. I løbet af de 2-3 år, som projektet har forløbet over, er der da heller ikke nogen entydig forskel mellem anlæggenes nøgletal, idet Stensgaard det ene år har haft det bedste nøgletal, og det næste år har det været Lyksvad.

Kølkjær Fiskeri og Abildvad dambrug er begge miljøgodkendt som model 1 dambrug, Abildvad har supplerende rensning svarende til kravene for et model 3 dambrug. Kølkjær Fiskeri er ca. dobbelt stor som Abildvad både hvad angår volumen af damme, årlig produktion af fisk, foderforbrug og stående bestand af fisk.

Recirkuleringsgraden er højere på Abildvad dambrug som følge af den indførte model 3 teknologi, men der bliver ikke produceret en tilsvarende større mængde fisk sammenlignet med Kølkjær, og derfor bliver nøgletallet for elforbrug pr. produceret ton fisk større på Abildvad.

Kongeåens dambrug er et model 3 dambrug, og recirkuleringsgraden er derfor relativt høj. Dermed er elforbruget også højt, men til gengæld bliver anlægget og teknologien udnyttet til en høj årlig produktion af fisk, så nøgletallet for elforbrug pr. produceret ton fisk bliver lavt i forhold til de andre anlæg.

Man kunne godt have forventet, at Kølkjær Fiskeri ville ligge lavere i energinøgletal end Kongeåens dambrug pga. den lavere recirkuleringsgrad kombineret med at produktionen i anlægget i forhold til anlæggets volumen er høj set i forhold til Kongeåens dambrug. Når det ikke er tilfældet, kan det evt. skyldes valg af teknologi. I Kølkjær Fiskeri er det valgt i høj grad at gøre brug af mammutpumper (se 6.3.4) til både flytning afgangning og iltning af vand, og mammutpumperne er her placeret i 4 m. dybe brønde for at sikre så god optagelse af ilt som muligt. På Kongeåens dambrug er det ligeledes valgt at gøre brug af mange mammutpumper. Her er nogle placeret i 2 m. dybe brønde og andre placeret i 4 m. dybe brønde.

Det må endvidere forventes, at Kongeåens dambrug har nogle stordriftsfordele, som viser sig i energinøgletallet. Det vil være et fast forbrug til drift af anlægget, og ved øgning af produktionsintensitet vil energiforbruget pr kg fisk falde.

På baggrund af den måde en mammutpumpe virker på, er det forventeligt at mammutpumpen ikke er særlig effektiv til at flytte vand i forhold til det energiforbrug der er til luft som forsyner mammutpumpen. Mammutpumpens placering i dyb eller lav brønd forventes også at have betydning for energiforbruget. Men der var fra projektets start ikke mange oplysninger at finde om mammutpumper. Derfor er det en af de teknologier, som projektet har undersøgt nærmere både i laboratorium og ved forsøg i dambrugsbassiner.

## 8 Afgrensning af undersøgelser

Kortlægningen har ført til en prioritering af, hvilke teknologier der skal undersøges nærmere for at belyse deres energieffektivitet.

I projektet er de forskellige iltning- og beluftningsmetoder undersøgt med det formål at finde ud af, hvilke metoder der er de mest energieffektive. Ved at tale med dambrugsejerne har vi erkendt, at det er en kompleks opgave at skulle afgøre om én metode generelt er bedre end en anden. Det hænger sammen med, at beluftning som regel tjener flere forskellige formål:

- Iltning af vandet
- Afgasning af CO<sub>2</sub>
- Afgasning af kvælstof
- Flytte vandet
- Skabe strømning i vandet

Det er valgt i den resterende del af projektet at fokusere på følgende:

- Iltning:
  - Energivurdering af metode til iltning med flydende ilt i iltkegler – herunder ReOx. Der er foretaget beregning hos Lyksvad Fiskefarm for at finde ud af, hvor energieffektiv en løsning Re-Ox er.
  - Det var planlagt at undersøge beluftning med ren ilt hos Stensgaard åleopdræt. Efter nærmere overvejelser, i samråd med iltleverandøren blev dette vurderet til en urentabel løsning.
  - Iltkegler: Energiforbruget til indløsning af ren ilt i iltkegler er undersøgt hos åleproducenterne, hvor denne løsning typisk vælges
  - Erfaringerne med anvendelse af deep shaft hos Royal Danish Seafood er kort beskrevet.
- Mammutpumpeprincippet: ret almindeligt brugt i branchen til beluftning / iltning / afgasning og samtidig flytning af vand.
  - Princippet undersøges ved forsøg på dambrug. Se kapitel 11.
- Pumper: især i ålebrugene fylder energiforbruget til pumpning meget i det samlede energiregnskab. Typisk 60-80% af energiforbruget. Følgende er undersøgt vedr. pumper:
  - Rentabilitet af at udskifte pumper til nye pumper hos Lyksvad – eksempel
  - Betydningen af coatede pumper
- Diffusorer: Energivurdering af forskellige måder at anvende luft-diffusorer på. Det er undersøgt i laboratorium og ved forsøg i dambrugsbassin, hvor effektive forskellige diffusorer er til at ilte vandet i dambrugsbassinet. Se kapitel 10, 11 og 12  
Herunder:
  - Betydning af dyb / lav placering af diffusor, bl.a. lavtryksdiffusor
  - Diffusor-rør med såkaldt ”gummistrømpe”
  - Betydningen af små og store huller i diffusor-rør
  - Betydningen af boblehastighed / volumenstrøm af luft

## 9 Skrivebordsundersøgelser

Dette kapitel omhandler de undersøgelser som er foretaget som skrivebordsundersøgelser. Det vil sige:

1. Rislefiltre
2. Luftbehov og blæsertyper
3. Iltkegler
4. ReOx
5. U-rør / deep shaft
6. Rentabilitet af pumpekraft
7. Coatede pumper

De øvrige undersøgelser, som er foretaget i hhv. laboratorium og som feltundersøgelser bliver beskrevet i kapitel 10, 11 og 12.

### 9.1 Rislefiltre

Der er gode erfaringer med at anvende rislefiltre på dambrug og ved åleproducenterne. Hos åleproducenterne er det særligt vigtigt at opnå en god afgang af kvælstof, fordi vandet recirkuleres i så høj grad, at kvælstofforbindelser kan ophobe sig i vandet og blive en begrænsning for produktionen. Erfaringerne viser, at rislefiltrene er særdeles velegnede til at afgasse kvælstof. Alternativet til at afgasse i rislefilter er at afgasse ved brug af lavtryksblæsere i et beluftningsbassin. Denne metode anvendes også hos nogle af landets åleproducenter, men hverken hos Stensgård eller Lyksvad, som deltager i dette projekt.

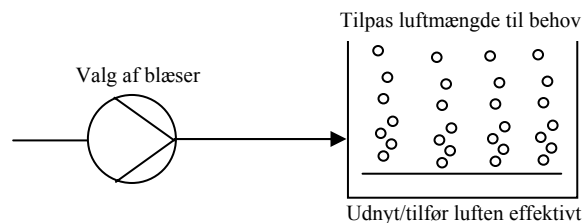
Der er indsamlet energinøgletal for 9 forskellige åleproducenter i Danmark, og der er ikke nogen entydig sammenhæng mellem energieffektiviteten for et åleanlæg der er opbygget med rislefilter eller lavtryksbeluftning.

Der blev i forbindelse med afgrænsning af undersøgelserne, valgt ikke at gennemføre målinger på rislefiltre.

### 9.2 Luftbehov og blæsertyper

Mulighederne for at spare energi på beluftning med blæsere kan anskues på følgende måde:

- 1) Tilpasse luftmængde til behov
- 2) Udnytte/tilføre luften effektivt i bassinet
- 3) Vælge den mest energieffektive blæser



#### 9.2.1 Tilpasse luftmængder til behov

Det er afgørende for anlæggets energieffektivitet, at luftmængderne er tilpasset behovet, og det er her der først og fremmest bør sættes ind, så der ikke tilføres for meget luft unødigt.



Behovet for luft vil typisk variere i løbet af dagen og vil stige i forbindelse med fodring. Behovet vil også variere afhængigt af belastningen af hele fiskeanlægget – dvs. hvor stor bestanden er og størrelsen af fiskene. Kvaliteten af fiskefoder har også stor betydning for luftbehovet i anlægget.

I branchen er der en udbredt forståelse af, at der er brug for meget stabilitet i driften af anlæg til fiskeopdræt, og derfor kører anlæggene typisk med konstant indstilling af blæserne, så de leverer max luftmængde hele tiden. Rationalet bag dette er ”hellere for meget end for lidt”, da der ikke er negative konsekvenser for fiskene ved brug af for meget luft. Dette hænger blandt andet sammen med, at der er flere forskellige parametre der skal tages hensyn til for at fastlægge behovet for beluftning:

- Ilt
- CO<sub>2</sub>
- Kvælstof

Det er derfor komplekst at fastslå det aktuelle luftbehov i anlægget. Men der vil klart være et væsentligt potentiale for energibesparelser, hvis der kunne findes en metode til at regulere luftmængderne på baggrund af det varierende behov.

De enkelte anlæg er dimensioneret forskelligt mht. til luftmængder. I nogle anlæg er luftflowet indstillet på baggrund af driftserfaringer og ved visuelt at vurdere om beluftningen ”ser rigtig ud”.

### **9.2.2 Udnytte/tilføre luften effektivt i bassinet**

For at få mest mulig nytte af den luft der blæses ind i bassinet er det afgørende at:

1. Opnå stor kontaktflade mellem luftbobler og vand
2. Luftboblerne får så lang opholdstid som muligt i vandet, inden de når overflader
3. Have så lavt modtryk / tryktab i systemet som muligt

I den sammenhæng er luftflow, beluftningsprincip, diffusorvalg og vanddybde er de vigtigste parametre. Samspillet mellem disse er undersøgt ved forsøg. Se kapitel 10 og 12.

### **9.2.3 Vælge den mest energieffektive blæser**

I de fleste anlæg – omfattet af dette projekt – er det valgt at anvende kapselblæsere til forsyning af luft. Umiddelbart er der 2 blæserprincipper at vælge imellem:

- Turbo blæsere (Radialblæsere), som er effektive ved lavt modtryk
- Kapsel blæsere (Fortrængning), som leverer konstant luft ved lavt til moderat modtryk

### **Undersøgelse af blæsere hos Lyksvad**

Det er – som eksempel - undersøgt på Lyksvad fiskefarm, om slid på gamle kapselblæsere og den teknologiske udvikling indenfor nye kapselblæsere gør det rentabelt at udskifte gamle kapselblæsere til nye.

Der er udført målinger og beregninger på de 2 kapselblæsere med henblik på vurdering af, om det er rentabelt at udskifte blæserne.

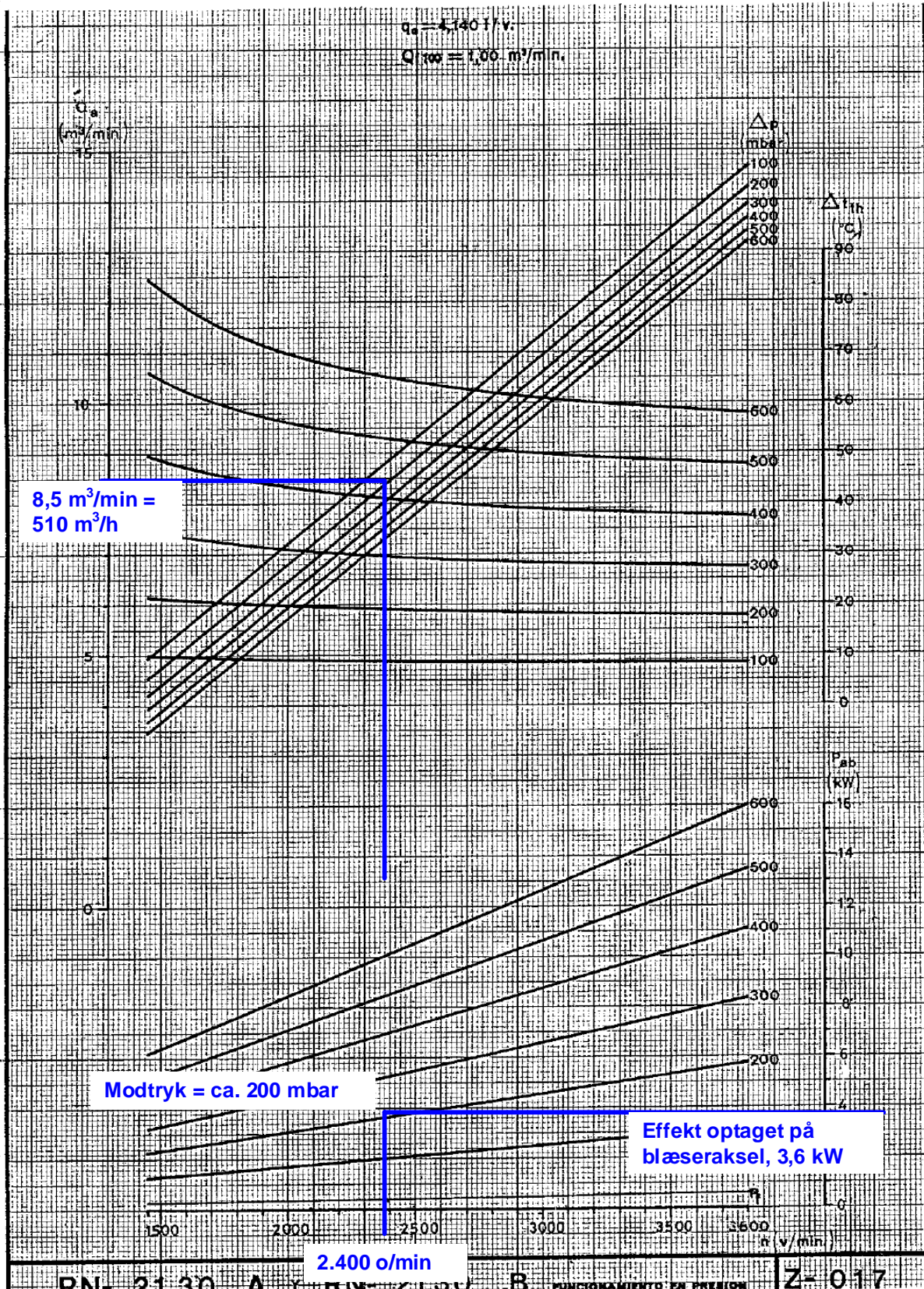
Metode:

- Hastighed af luftstrømme er målt med pitot-rør i de rør som fører luften fra kapselblæser til beluftningsbassin. Der er målt hastighed kort efter udløb fra blæseren + kort før indløb til bassin.
- Der er målt effektoptag på blæser-motorer med nano-vip måler. Motorvirkningsgraden er antaget til at være 75%.
- Den eksisterende udveksling imellem motor og blæser er anvendt for at beregne omdrejningstal for blæser-aksel.
- Luft-flow er vurderet dels ved aflæsning af kurvedigrammer for blæsere og ved at anvende målingerne med pitot-rør.
- Tryktab i rørstrækning er vurderet

**Tabel 6: målinger på blæsere hos Lyksvad Fiskefarm**

	Blæser 1 ("Pedro Gil")	Blæser 2 ("Hibon pompes")
Flow målt med pitot rør	770 m <sup>3</sup> /h	534 m <sup>3</sup> /h
Effektoptag på motor, målt	4,8 kW	5,2 kW
Modtryk i system, aflæst	200 mbar	250 mbar
Omdrejninger på blæseraksel	2.397 o/min	3.486 o/min
Flow ifølge kurvedigram	510 m <sup>3</sup> /h	440 m <sup>3</sup> /h
Tryktab i rørstrækning	36 mbar	23 mbar
Energiforbrug pr. m <sup>3</sup> , v. målt flow	0,0062	0,0097
Energiforbrug pr. m <sup>3</sup> , v. aflæst flow	0,0094	0,0118

Se aflæsninger på kurvedigrammet for blæser 1 i Figur 22.



Figur 22: Indskannet kurvediagram for blæser 1 med aflæsninger.

Der var ret stor forskel på luft-flowet målt med pitot-rør og luft-flowet aflæst på kurvediagrammet. Umiddelbart skulle der ikke være særlig store usikkerheder forbundet med metoderne, så det er uvist hvad der er årsag til afvigelsen.

Leverandøren af Pedro Gil kapselblæsere i Danmark er Hans Buch. Her giver Torben Riis Hansen udtryk for, at der ikke er sket en udvikling af kapselblæsere der retfærdiggør en udskiftning. Så det vil typisk ikke kunne betale sig at skifte for at spare energi baseret på den teknologiske udvikling.

Målingerne tyder på, at slid på de gamle kapselblæsere ikke har haft negativ betydning for hvor meget luft blæsere leverer pr. kWh ved det aktuelle modtryk. Derfor konkluderes det, at det ikke vil være rentabelt at udskifte de gamle blæsere til nye. Der findes i øjeblikket ikke andre blæsertyper, som kan erstatte kapselblæsere, da modtrykket er for stort til at en radialblæser kan klare opgaven.

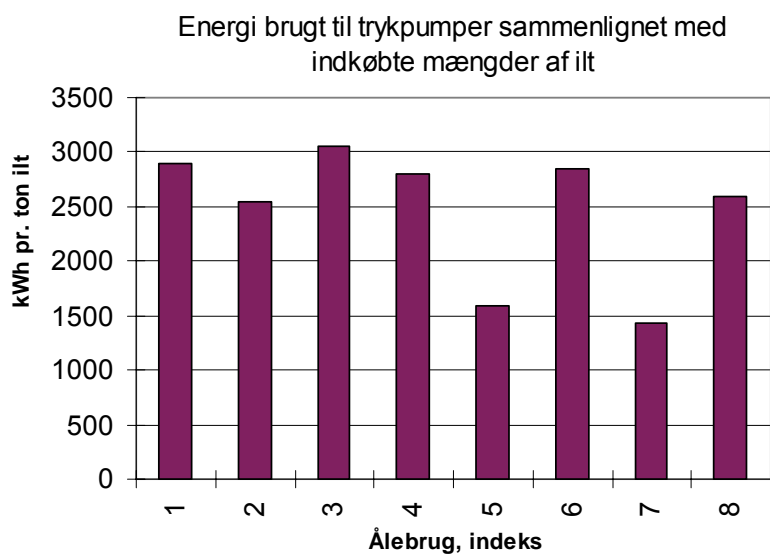
En anden konklusion vi kan drage af målingerne er, at det kun er ca. 10% af det samlede modtryk i anlægget, som ligger i rørstrækningen. De sidste 90% ligger i modtryk fra vandsøjlen og i diffusorer.

Eksemplet her er ikke nødvendigvis retvisende for, hvordan det forholder sig i resten af branchen. Det kan derfor stadig være relevant i andre fiskeopdræt at undersøge rentabiliteten af at udskifte blæsere. Men eksemplet indikerer; At det sandsynligvis er i indstillingen af luftflow, valg af beluftsprincip, vanddybde og diffusorvalg hvor muligheden for energibesparelse er størst.

### 9.3 Iltkegler

I iltkeglerne indløses flydende ilt i vand under tryk. Der anvendes trykpumper til at løfte vandet op til toppen af iltkeglen og til at skabe driftryk. (Se afsnit 6.4.6)

Energieffektiviteten er undersøgt ved at sammenligne energiforbruget til trykpumperne med mængden af flydende ilt, som er blevet købt. Ålebrugene er indekseret med numre.



Figur 23: sammenligning af forbrug til drift af iltkegelpumper / trykpumper og indkøb af flydende ilt hos ålebrug

Denne sammenligning siger ikke entydigt noget om energieffektiviteten i brugen af iltkeglerne, fordi:

1. Trykpumperne leverer ikke kun tryk til iltkeglerne. De leverer også cirkulation af vandet. Derfor bør energiforbruget til trykpumperne ikke udelukkende allokeres til indløsning af ilt.
2. Den indkøbte mængde af flydende ilt indløses ikke 100 % i iltkeglerne. Ifølge oplysninger fra AGA, vil ca. 5-10 % af ilten gå tabt, medmindre der anvendes ReOx metode (se beskrivelse side 55)

For at forklare hvad der kan forårsage forskellene er det relevant at sammenligne et af de ålebrug som ligger lavt i energiforbrug pr. indkøbt ton ilt med et af de ålebrug som ligger højt. Der er nogle væsentlige forskelle i opbygningen af anlæggene. De ålebrug der umiddelbart giver mest mening at sammenligne er ålebrug 5 og 6. Forskellen i driften på de 2 ålebrug er hovedsageligt:

- a. Der produceres 8 gange mere på ålebrug 5 end på ålebrug 6
- b. Der cirkuleres 45 % mere vand pr. stående ton ål i ålebrug 6 end i ålebrug 5
- c. Der ledes ca. dobbelt så meget friskt vand ind i ålebrug 6 som i ålebrug 5 pr. produceret ton ål

Forskellen i energieffektivitet kan dermed bl.a. skyldes, at der flyttes mere vand rundt i ålebrug 6 end i ålebrug 5, og at en del af trykpumpe-energien reelt bruges til at flytte vand. Trykket i iltkegler skal hæves til ca. 0,8 bar. Hvis der pumpes mere vand end nødvendigt i forhold til iltningens behovet gennem iltkegle vil der således blive et energitab, idet trykket drøvles i fiskebassinerne. Vandtransport til fjernelse af affaldsstoffer kan klares med et langt mindre tryk.

## 9.4 ReOx

ReOx øger iltningsskapaciteten i hver kegle med op til 50 % ved normal vandmængde og ved samme driftryk. Yderligere kan kegler med monteret ReOx opnå en forøgelse på 25 % af den nominelle vandmængde.<sup>4</sup>

Brug af ReOx kræver et højere vandtryk end der normalt bruges på iltkeglerne hos danske åleopdræt. I projektet er der gennemført beregninger på, hvad brugen af ReOx vil betyde energimæssigt. Her er der taget udgangspunkt i:

**Tabel 7: Data for iltkegle uden anvendelse af ReOx, eksempel**

Vandføring på iltkegle	180	m <sup>3</sup> /h
Vandføring på iltkegle i l/s	50	l/s
Driftryk på iltkegle	0,8	bar
Driftryk på iltkegle, kPa	80	kPa
Teoretisk effekt	4	kW
Virkningsgrad, pumpe	0,77	
Teoretisk pumpeeffekt	5,2	kW
Virkningsgrad, motor	0,9	
Teoretisk motoreffekt	5,8	kW
Indløst ilt	1,1	kg/h
Indløst ilt pr. år	9.811	kg/år
Udnyttelsesgrad	90	%
Ilforsbrug	10.901	kg/år

<sup>4</sup> ([www.AGA.no](http://www.AGA.no))

Ved anvendelse af ReOx med et drifttryk på 3,8 bar vil det opiltede vand indeholde min. 5-8 gange<sup>5</sup> mere ilt pr. liter i forhold til det ovenstående, hvor drifttrykket er lavere. Dvs. at en given vandstrøm kan medføre mere ilt, og dermed mindske behovet for vandføring til iltkeglen.

Ved beregning af nødvendig pumpeeffekt til iltning ved den reducerede vandføring i iltkegler på hhv. en faktor 5 og faktor 8, fremkommer resultaterne vist i Tabel 8.

**Tabel 8: Beregning af effektforsøg til iltning ved anvendelse af ReOx metoden**

<b>Med ReOx, faktor 5</b>			<b>Med ReOx, faktor 8</b>	
Estimeret flow pr. iltkegle	36	m <sup>3</sup> /h	22,5	m <sup>3</sup> /h
Estimeret flow pr. iltkegle	10	l/s	6,25	l/s
Drifttryk på iltkegle	3,8	bar	3,8	bar
Drifttryk på iltkegle	380	kPa	380	kPa
<b>Teoretisk effekt</b>	<b>3,8</b>	<b>kW</b>	<b>2,375</b>	<b>kW</b>
Virkningsgrad, pumpe	0,77		0,77	
Teoretisk pumpeeffekt	4,9	kW	3,1	kW
Virkningsgrad, motor	0,9		0,9	
<b>Teoretisk motoreffekt</b>	<b>5,5 kW</b>		<b>3,4 kW</b>	
Hvis der er behov for at flytte de 180 m <sup>3</sup> /h:				
Antaget behov for H	0,1	bar	0,1	bar
Antaget behov for H	10	kPa	10	kPa
Behov for flow	144	m <sup>3</sup> /h	157,5	m <sup>3</sup> /h
Behov for flow	40	l/s	43,75	l/s
<b>Teoretisk effekt</b>	<b>0,4</b>	<b>kW</b>	<b>0,4375</b>	<b>kW</b>
Virkningsgrad, pumpe	0,77		0,77	
Teoretisk pumpeeffekt	0,5	kW	0,6	kW
Virkningsgrad, motor	0,9		0,9	
Teoretisk motoreffekt	0,6	kW	0,6	kW
<b>Samlet motoreffekt</b>	<b>6,1 kW</b>		<b>4,1 kW</b>	
Besparelse v. 8760 timers årlig drift	-2.528	kWh/år	15.011	kWh/år
Besparelse v. 8760 timers årlig drift, kr.	-1.770	kr/år	10.508	kr/år
Indløst ilt	1,1	kg/h	1,1	kg/h
Indløst ilt pr. år	9.811	kg/år	9.811	kg/år
Udnyttelsesgrad (www.aga.no)	99,5	%	99,5	%
Ilforbrug	9.861	kg/år	9.861	kg/år
Besparelse på ilt	1.769	kr/år	1.769	kr/år
<b>Samlet besparelse</b>	<b>0</b>	<b>kr/år</b>	<b>12.277</b>	<b>kr/år</b>

Da der regnes med reduceret vandflow gennem iltkeglen, kan det evt. være nødvendigt at foretage supplerende vandudskiftning i opdrætsbassinerne for at fjerne affaldsstoffer. I beregningerne ovenfor er det antaget at der er brug for en vandudskiftning på 180 m<sup>3</sup>/h – dvs. samme som uden brug af ReOx.

<sup>5</sup> Primært med baggrund i et øget partialtryk af iltten – se kapitel 5, samt en mere optimal drift af iltkeglen



Anvendelse af ReOx metoden medfører et mindre forbrug af ilt på grund af mere effektiv indløsning af ilten. I eksemplet er det antaget, at der er ca. 10 % spild af ilt uden anvendelse af ReOx, mens spildet kun er ca. 0,5 % ved anvendelse af ReOx.

Det er tvivlsomt at det er rentabelt at indføre ReOx på de fleste eksisterende åleanlæg. Det skyldes, at der skal laves om på eksisterende rørføring. Ved estimat på et typisk, eksisterende åleopdræt med en intern vandføring på ca. 2.500 m<sup>3</sup>/h, bliver den samlede årlige driftsbetarelse på ca. 160.000 kr. Derudover må det forventes at investering og vedligehold af pumper vil blive lavere pr. år, da der anvendes mindre pumper.

Dermed bliver ReOx en attraktiv løsning ved nyanlægelse eller gennemgribende renovering.

## 9.5 U-rør / deep shaft

I Danmark er det primært åleproducenter, der anvender deep shafts i deres anlæg. I praksis er der lagt et rør fra beluftningsbassinet efter biofilteret og over til ålebassinerne. Røret ligger i 4-5 meters dybde, og der sidder en pumpe som tilsætter ilt i bunden af røret. Erfaringerne med deep shafts er på positiv siden:

- Der bliver flyttet en masse vand relativt billigt pga. ingen løftehøjde
- I princippet skulle deep shaft give en iltindløsning på ekstra ca. 10% i forhold til iltindløsning i kegler. Driftslederen af anlægget er dog usikker på, om de opnår de ekstra 10 %. Han mener, at man skal være ”dygtig til at indløse ilten” for at få fuldt udbytte af deep shafts

Ulemper:

- Deep shaft pumpen er ikke særlig tilgængelig. Det giver bøvl, når pumpen skal repareres eller skiftes. Den sidder langt nede og er frygtelig tung. Desuden kan der falde en masse ting ned i røret. De tørtopstillede iltkeglepumper er mere overskuelige at håndtere.
- Ved at placere deep shaften lige efter beluftningsbassinet er der risiko for at trække bobler og dermed kvælstof med ned i U-røret, hvilket medfører overmætning med kvælstoffen. Det kan give ålene ”dykkersyge” og er meget vigtigt at undgå.
- Det er svært at etablere i et eksisterende anlæg, da det kræver megen ombygning

Energimæssigt er der beregnet på et åleanlæg hos Lyksvad Fiskefarm

**Tabel 9: Etablering af Deep shaft for anlæg 700 hos Lyksvad Fiskefarm**

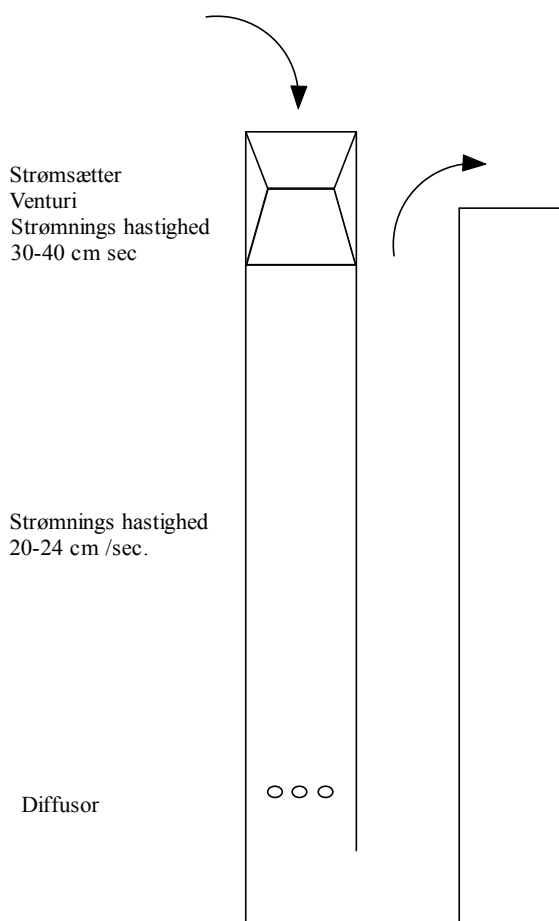
Pumpe fabrik	Pumpetype	Antal	Pris pr pu kr	Flow [m <sup>3</sup> /h]	Løftehøjde [mVs]	P1 kW	Forbrug i alt kWh/år	Besparelse kwh/år	kr/år
Smedegaard	Omega 15 225 - 6	6	48.350	180	0,75	1,646	86513,8	333090,2	199854

Konklusionen på undersøgelsen er, at der er et væsentligt energisparepotentiale i forbindelse med driften, men der er en del praktiske udfordringer ved at anvende metoden, og det er vanskeligt og bekosteligt at bygge ind i et eksisterende anlæg. Det kan endvidere være vanskeligt at få myndighedsgodkendelse til at anlægge en deep shaft.

### 9.5.4 Designforslag for deep shaft / U-rør

Ved at anvende en deep shaft konstruktion der tager hensyn til de tilsatte iltboblers opstigningshastighed er det muligt at lave en konstruktion med et meget lille energiforbrug. Figur 24 viser et principdiagram af denne konstruktion. Vandet ”presses igennem deep shaften ved hjælp

af en strømsætter. Strømsætteren er udformet således at vandet vil have en hastighed der overstiger 30 cm sek. hvilket forhindre uopløst ilt i at undslippe. Strømningshastigheden gennem den resterende del af er så lav at ilt bobler langsomt vil strømme mod toppen. Den eneste energi der kræves, er den energi der skal til for at overvinde tryktab i form af modstand samt densitets forskel mellem vand og gas/ vand fasen.



Figur 24: Designforslag til udførelse af deep shaft

## 9.6 Rentabilitet af pumpeskift

Der sker en løbende udvikling af pumper, så de bliver mere og mere energieffektive. Spørgsmålet er, om det er rentabelt at skifte ældre pumper ud med nye. Pumpeskift kan i den sammenhæng være rentabelt af 2 årsager:

1. Fordi der er sket en teknologisk udvikling fra den gamle model til den nye model
2. Fordi den gamle pumpe er slidt og derfor ikke har samme ydelse længere

I dette afsnit er der fokuseret på punkt 1, mens punktet om slitage er beskrevet i afsnit 9.7

Rentabilitet af pumpeskift vil altid skulle vurderes individuelt på det enkelte anlæg. Her er det valgt at beregne et eksempel, for at belyse på hvilket niveau man kan forvente at investeringer, energibesparelser og tilbagebetalingstider ligger.



Da det hovedsageligt er åleanlæggene der er energitunge på pumpesiden, er der igen taget udgangspunkt i Lyksvad Fiskefarm. Det er valgt at regne på det nyeste anlæg, som er det anlæg hvor det var muligt at fremskaffe pumpeavne, flow og løftehøjde på de eksisterende pumper.

Der er brugt Grundfos WinCaps program til at finde nye pumper til erstatning af de eksisterende pumper.

I anlægget er der på nuværende tidspunkt fire trykpumper og fire returpumper.

Trykpumper:

2 \* CLM 150 15 kW; flow = 300 m<sup>3</sup>/h og løftehøjde = 12 mVs.

2 \* CLM 150 7,5 kW; flow = 180 m<sup>3</sup>/h og løftehøjde = 8 mVs.

Returpumper:

4 \* CLM 150 6 polet 4 kW; flow = 180 m<sup>3</sup>/h og løftehøjde = 4 mVs.

Da anlægget blev lavet i 1997 var der seks ens trykpumper: CLM 150 7,5 kW.

Der er lavet beregninger på to scenarier:

- 1) Trykpumperne og returpumper bliver udskiftet så de svarer til de nuværende pumper.
- 2) Trykpumperne bliver udskiftet så de svarer til anlæg 700 1997, dvs. 6 \* 7,5 kW.  
Returpumperne bliver udskiftet så de svarer til de nuværende pumper.

Scenarie 1: giver ikke en besparelse da de to 15 kW pumper bliver udskiftet med 2 \* 18,5 kW pumper:

Målt forbrug af eksisterende pumper på anlæg 700: 555.384 kWh pr. år

Beregnet forbrug efter udskiftning: 568.688 kWh pr. år

Scenarie 2: giver besparelse efter de to 15 kW pumper udskiftes med 4 \* 4 kW pumper:

Målt forbrug af eksisterende tryk- og returpumper på anlæg 700: 555.384 kWh pr. år

Beregnet forbrug efter udskiftning: 402.349 kWh pr. år

Dette svare til en procentvis besparelse på 27,5 %

Hvis det antages, at besparelsen er på 15 %, ved udskiftning af alle tryk- og returpumper i alle anlæg, bliver den totale energibesparelse:

$0,15 * (1.109.508 + 373.956) \text{ kWh pr år} = 222.519,6 \text{ kWh pr år.}$

### **Økonomi for det beregnede anlæg**

Priserne for TP pumperne er fundet i Grundfos prislister vejledende udsalgspriser jan. 2007.11.01 NB pumpens pris er fundet efter samtale med Grundfos medarbejder. Der er ikke regnet med evt. rabatter.

Pumper	Pris Kr.
TP 150 -110 / 6	27.160
TP 150 -90 / 6	24.250
TP 150 -90 / 6	24.250
TP 150 -110 / 6	27.160
TP 150 -90 / 6	24.250
TP 150 -90 / 6	24.250
NB 150 - 200 / 224	86.890
NB 150 - 200 / 224	86.890
NB 150 - 200 / 224	86.890
NB 150 - 200 / 224	86.890
I alt	498.880

Der antages at prisen er 0,7 Kr./ kWh

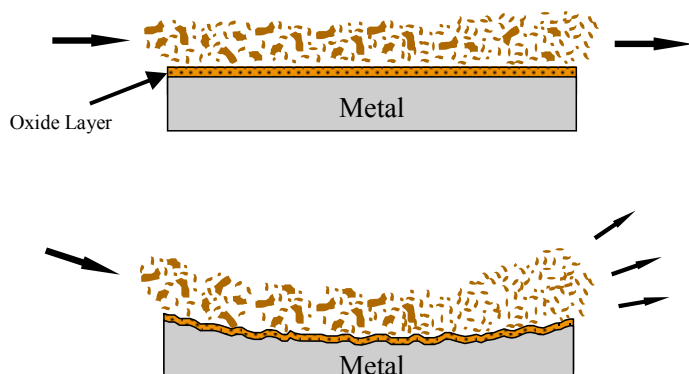
Besparelse		Tilbagebetalingstid
kWh / År	Kr. / År	År
153035	107125	4,66

Som det ses ovenfor er der en tilbagebetalingstid på ca. 4,7 eller 4 år og 8 måneder

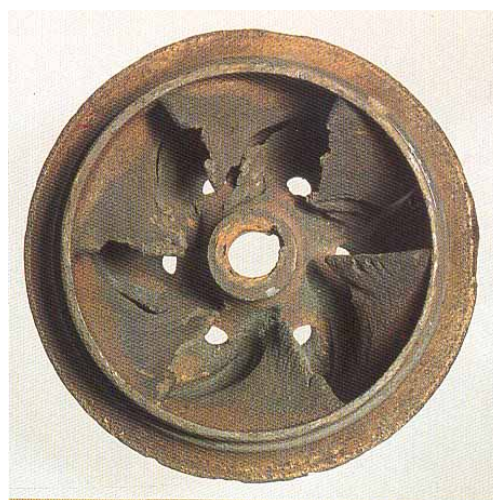
## 9.7 Coatede pumper

På baggrund af tidligere forskningsprojekter (ELFORSK 336-008 ”Coating af pumper”) ved vi, at det er rentabelt at anvende coatede pumper, i et aggressivt miljø.

Fra ny har en pumpe en ren og forholdsvis glat overflade i pumpehus og på løbehjulet. Med tiden bliver denne overflade nedbrudt dels af korrosion, dels af erosion i pumpen.



Figur 26: Overfladenedbrydning som følge af korrosion. Kilde: Chesterton



Figur 26: Eksempel på erosions korrosion i et løbehjul af støbejern. Kilde: Korrosion Atlas, steel metals

Korrosion af pumpens overflade er en naturlig og forventelig proces. Korrosionshastigheden afhænger af det materiale som pumpehus og løbehjul er lavet af, og det afhænger af det medie, der skal pumpes. Resultatet af korrosion i pumper er, at der fjernes materiale fra pumpens overflade, som giver pumpe og løbehjul en ru og uensartet overflade.


Overfladenedbrydningen i pumper medfører stigende ruhed, som igen medfører tab i ydelse og virkningsgrad.

Det er ved forsøg i det tidligere ELFORSK projekt dokumenteret, at en beskyttelse af pumpens indre dels vil optimere pumpen, dels fastholde den optimerede virkningsgrad i årene fremover.


Der er således to anskuelser:

1. Beskyttelse af en ny pumpe med det formål, at pumpen ikke korroderes og slides og dermed får ruhed og deraf følgende energitab.
2. Renovering og beskyttelse af en eksisterende pumpe med det formål, at pumpen kommer tilbage til udgangspunktet og endog forbedres i forhold til det oprindelige udgangspunkt, og således fastholde den forbedrede performance og energieffektivitet fremover.

I projektet ”Coating af pumper” er der således dokumentation for, at coating har en positiv betydning for pumpeens energieffektivitet, specielt hvis de sidder i et korrosivt miljø. Jakob Albertsen A/S, som er leverandør af coating, har sammen med Teknologisk Institut udviklet et regneark, hvor det på baggrund af forskellige oplysninger om pumpen regnes ud, hvor god rentabilitet der vil være af at coate en gammel pumpe. Indtastningssiden i værktøjet er vist her, hvor der som eksempel er brugt en af trykpumperne hos Stensgaard Åleopdræt:

<b>Jakob Albertsen A/S</b>				
<b>Indtastning af data for beregning af rentabilitet ved renovering af pumpe</b>				
<b>Virksomhed og pumpe</b>				
Virksomhed:	Ålefarm			
Afdeling:	Cirkulationspumper			
Pumpeapplikation:	Trykpumpe 1			
Pumpemodell:				
<b>Driftsprofil</b>				
Gennemsnitlig effektoptag:	13,0 kW			
Årlig driftstid:	8.760 timer			
Gennemsnitlig elpris	0,7 kr./år			
<b>Pumpens tilstand og mediets beskaffenhed</b>				
Pumpens alder:	2	0-5 år = 1	5-10 år = 2	10 + år = 3
Mediets korrosivitet:	3	ringe = 1	middel = 2	stærk = 3
Mediets slid-ævn:	1	ringe = 1	middel = 2	stærk = 3
Pumpens materiale:	1	uædelt = 1	ædelt = 0,5	
<b>Pumpe data</b>				
Pumpens omløbstal:	1500 o/min			
Trykdifferens	0,7 bar			
Motorstørrelse	11 kW	DN<100mm	100-200mm	DN>200mm
Pumpe størrelse:	2	lille = 1	mellem = 2	stor = 3

Resultatsiden af beregningen er:

<b>Jakob Albertsen <sup>A</sup></b>		
<b>Beregning af rentabilitet ved renovering og coating af pumpe</b>		
<b>Beskrivelse af pumpe:</b>		
Virksomhed	Ålefarm	
Afdeling	Cirkulationspumper	
Pumpeapplikation	Trykpumpe 1	
Pumpemodel		
<b>Beregning af årligt elforbrug til pumpe:</b>		
Gennemsnitlig effekt	13,0 kW	
Årlig driftstid	8.760 timer	
Årligt elforbrug	113.880 kWh/år	
Gennemsnitlig elpris	0,7 kr./år	
Årlig elomkostning	79.716 kr./år	
<b>Pumpens tilstand og mediets beskaffenhed</b>		
Pumpens alder	2	0-5 år = 1 5-10 år = 2 10 år+ = 3
Mediets korrosivitet	3	ringe = 1 middel = 2 stærk = 3
Mediets slid-egne	1	ringe = 1 middel = 2 stærk = 3
Pumpens materiale	1	uædelt = 1 ædelt = 0,5
Besparelsesfaktor ved renovering	0,7	
<b>Beregning af specifik hastighed</b>		
Pumpen omløbstal	1500	o/min
Trykdifferens	0,7	bar
Motorstørrelse	11	kW
Beregnet flow	339,42857	m <sup>3</sup> /h
Specifik hastighed (sh)	6.422	-
<b>Beregning af energibesparelse:</b>		
Coating af pumpehus og hjul	10,0 %	Max 30% for sh under 2000, ellers max 15%
Renovering af indre tætning	5,0 %	Max 15% for sh under 2000, ellers max 7,5%
Samlet forbedring ved renovering	15,0 %	
Energibesparelse i kWh	17.082 kWh/år	
Energibesparelse i kr.	11.957 kr./år	
<b>Rentabilitetsberegning;</b>		
Pris coating:	10.000 kr.	6 - 18.000 kr. afhængig af størrelse
Pris renovering indre tætning	2.000 kr.	Ca. 20% af coatingprisen
Pris håndtering af pumpe	2.000 kr.	Ca. 20% af coatingprisen
Samlet investering	14.000 kr.	
<b>Tilbagebetalingstid</b>	<b>14,05 mdr.</b>	
<b>Overskud efter 5 år</b>	<b>45.787 kr.</b>	
<b>Overskud efter 10 år</b>	<b>105.574 kr.</b>	

Beregningen tyder umiddelbart på, at det er rentabelt at coate større pumper i åleanlæg. Men det ses også, at resultatet af beregningen afhænger af hvordan vandets korrosivitet vurderes.

Spørgsmålet i denne sammenhæng er så, hvor korrosivt et miljø der reelt er i dambrugsvand og åleopdrætsvand, og i hvor høj grad det tærer pumperne.

Umiddelbart forventes det at være i åleanlæggene at det mest aggressive vand er, fordi:

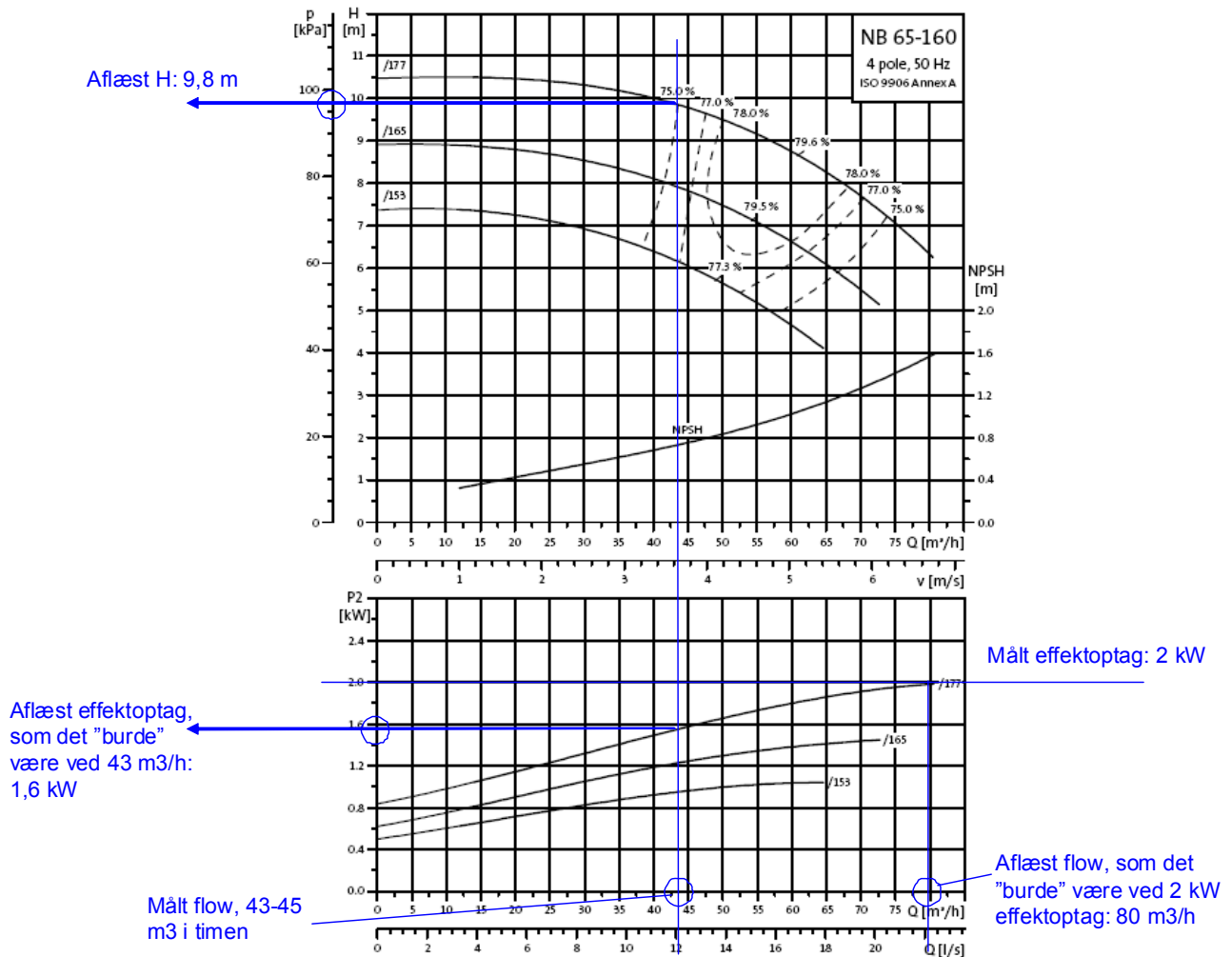
1. Temperaturen er højere
2. Nogle af anlæggene har lidt salt i vandet altid, og andre tilsætter salt i forbindelse med sygdomsbekæmpelse
3. Vandet i åleanlæggene har en pH på ca. 4-6

### **Undersøgelse af ny og gammel pumpe i åleanlæg**

For at undersøge det nærmere er der foretaget målinger på ydelsen af ældre pumper i åleanlæg, for at se hvordan deres ydelse og energieffektivitet er set i forhold til en ny pumpe af samme slags. I praksis har det været vanskeligt at komme til at måle ret mange steder, fordi der skal være en tilpas lang lige rørstrækning for at en flowmåling med det anvendte udstyr bliver retvisende. I eksemplet vist nedenfor er der gjort følgende:

1. Der er målt vandflow på en 6 år gammel pumpe. Flowet blev målt i en lodret, lige rørstrækning med flowmåler. Den anvendte flowmåler er af typen "Fluxus adm 6515", som er en ultralydsflowmåler der spændes fast på ydersiden af røret. Metoden kan være forbundet med store usikkerheder.
2. Den optagne effekt på pumpemotoren er målt med tang-effektmåler.
3. Målingen er foretaget som en spot-måling. Dvs. der er ikke foretaget logning over en længere periode.
4. Da den gamle pumpe var målt, blev den skiftet ud med en ny pumpe af samme slags, som stod på lageret. Den nye pumpe blev sat samme sted som den gamle. Dvs. flanger, rørstrækninger, tilsmudsning og løftehøjde er det samme for den nye og den gamle pumpe.
5. Flow og effekt blev målt på samme måde for den nye pumpe som for den gamle.

Resultatet er tegnet ind i pumpe- og motordiagrammet for den pågældende pumpetype herunder:



Resultater af målingen:

1. Målingerne på den nye og gamle pumpe var overraskende nok stort set ens – både mht. flow og effekt.
2. Ved det målte effektoptag på 2 kW, skulle pumpen ifølge diagrammet levere ca. 80 m<sup>3</sup>/h, hvor det målte flow var 43-45 m<sup>3</sup>/h. Det vil sige kun ca. 56 % af den forventede ydelse.
3. I anlægget er der en geometrisk løftehøjde på max. 5m. Af pumpekurven aflæses, at pumpen oplever en løftehøjde på 9,8 m ved de 43-45 m<sup>3</sup>/h. Selv om der kan være usikkerhed i flowmålingen, burde det ikke give anledning til så store forskelle i løftehøjde.

Refleksioner over resultaterne:

- Pumpens ydelse er ifølge målingerne meget ringere end forventet, og derfor kunne man forvente at det på den gamle pumpe skyldtes tæring eller tilsmudsning. Men da målingerne på en helt ny pumpe viste samme resultat, kan dette ikke være hovedårsagen.
- Løbehjulet på den gamle pumpe var lidt ru at røre ved, men så ikke ud til at være tæret i særlig høj grad.
- I det anlæg hvor målingerne blev foretaget anvendes der kun salt i forbindelse med sygdomsbekæmpelse.

- Der er foretaget målinger på gamle pumper i nogle af de andre åleanlæg. De har alle – i varierende grad – vist at pumpernes ydelse ifølge målingen er væsentligt mindre end det der er angivet på pumpe- og motorkurven.
- I et af de andre åleanlæg viste adskillelse af en gammel pumpe, at løbehjulet var ret kraftigt tæret. Det tyder på at vandets korrosivitet er forskelligt fra anlæg til anlæg
- Det er erfaringen, at der kan være store usikkerheder forbundet med flowmåling med ultralydsmetode. Derfor bør det undersøges nærmere om målingerne vist her er et udtryk for de reelle forhold, eller om der er fejl i forbindelse med målingen.
- Ved samtale med Uwe Pørksen fra Grundfos: det er forventeligt at pumpens ydelse kan være lidt mindre i et åleanlæg end den teoretiske kurve viser. Det skyldes, at den teoretiske kurve er baseret på helt rent vand, og vandet i åleanlæggene er relativt grumset. Grundfos forventer også, at vandet i åleanlæggene er korrosivt baseret på deres erfaringer på akvakultur markedet.
- Driftslederne på de forskellige åleanlæg har forskellige erfaringer med, hvor meget pumperne tæres og slides. I nogle anlæg kører pumperne i mange år stort set uden at skulle vedligeholdes, mens der i andre anlæg forbyggende skiftes tætninger og løbehjul.

#### Konklusion

Det er ikke muligt på baggrund af ovenstående at konkludere entydigt, om hel eller delvis coating af pumper er en rentabel idé, da der er usikkerhed om hvad den lave pumpeydelse reelt skyldes. Dette bør således undersøges nærmere. Hvis det vælges at coate pumpehjul og/eller –hus vurderes det dog, at dette bør gøres ved anskaffelsen, da det er for dyrt og besværligt at coate en gammel pumpe og sætte den tilbage i anlægget igen.

## 10 Forsøg ved Abildvad ørreddambrug

### 10.1 Indledning

Forsøget indeholder opmålinger af to typer diffusorer til iltning af vand i en opdrætskumme. På Abildvad Dambrug var der mulighed for at bruge en opdrætskumme (se Figur 27 og Figur 28) uden fisk til at lave to forsøg med to forskellige diffusorer.

- Måling af den eksisterende diffusor
- Måling på en lavtryksdiffusor fra Christian Jørgensen ApS

Begge typer diffusorer er benyttet på danske dambrug.

### 10.2 Formål

Forsøget på Abildvad havde til formål at kortlægge effektiviteten af iltningen i forhold til den tilførte luft og dermed det anvendte energiforbrug, ved brug af de to førnævnte typer diffusorer.

Med forsøgene er det muligt at sammenligne de to typer diffusorer direkte. Ved at variere luftstrømmen ved forsøgene med lavtryksdiffusoren ses der også på luftstrømmens betydning for iltningen ved sammenligning mellem disse forsøg.

### 10.3 Udførte forsøg

Der er udført 4 forsøg i en opdrætskumme uden fisk.

1. Det eksisterende beluftningsprincip. Luftstrømmen ved forsøget er den samme som normal drift. luftstrømmen blev målt til  $q_{\text{eks}} = 2,47$  l/s
2. Beluftning via lavtryksdiffusor der er placeret 0,8m under vandoverflade med et luftflow på  $q_{\text{ld1}} = 2,54$  l/s.
3. Beluftning via lavtryksdiffusor der er placeret 0,8m under vandoverflade med et luftflow på  $q_{\text{ld2}} = 5,41$  l/s.
4. Beluftning via lavtryksdiffusor der er placeret 0,8m under vandoverflade med et luftflow på  $q_{\text{ld2}} = 27,41$  l/s.

Det forventes at fiskene i en opdrætskumme ikke vil reducere omrøringen, teoretisk set er de med til at forbedre den

#### Resultater fra forsøgene sammenlignes ud fra de målte og beregnede parametre:

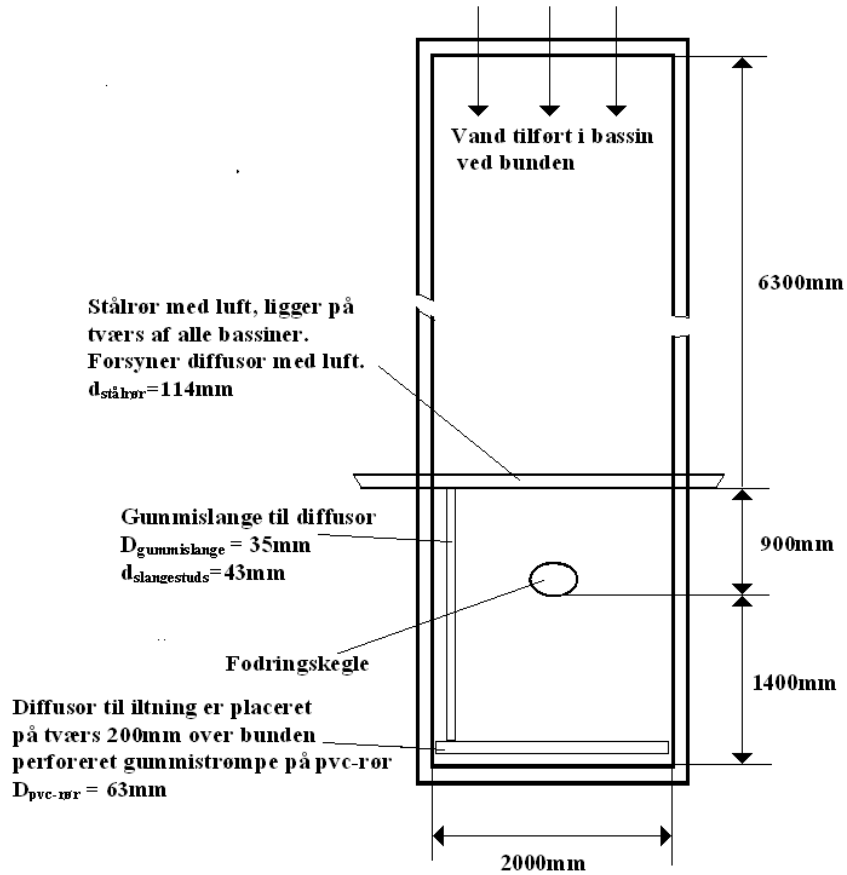
- Det målte iltindhold [%]
- Lufthastighed [m/s](luftstrømmen [l/s])
- Beregnet energiforbrug til iltning [kWh]

#### Supplerende målinger

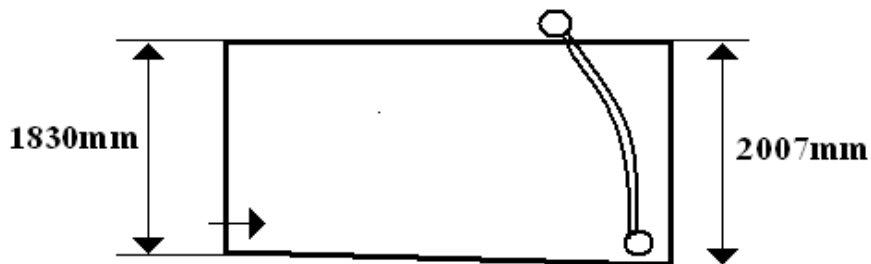
- Den tilførte lufts statiske tryk [Pa]
- Den tilførte lufts dynamiske tryk (tjek af lufthastighedsmåling) [Pa]
- Vandtemperatur [°C]
- Lufttemperatur [°C]



## 10.3.1 Forsøgsopstilling i kumme på Abildvad dambrug.



Figur 27 Skitse af forsøgskumme på Abildvad dambrug, set oppefra



Figur 28 Skitse af forsøgskummen set fra siden. Det ses hvordan kummebunden skrånar

### Eksisterende kummediffusor på Abildvad dambrug

Som det ses på billedet (Figur 29) er diffusoren placeret på tværs af kummen 50 cm over bunden i kummens udløbsende. Diffusoren består af et pvc-rør med en række huller med diameter på 20 mm. Uden på røret er trukket en gummistrømpe som er perforeret med snit på ca. 2mm.



Figur 29 Eksisterende kummediffusor på Abildvad dambrug

### Lavtryksdiffusor:

Christian Jørgensen ApS havde fremstillet en lille lavtryksdiffusor (Figur 30) som passer til forsøgskummen i Abildvad.

For at installere lavtryksdiffusoren i opdrætskummen demonteres slangen til den eksisterende diffusor og tilkobles efterfølgende lavtryksdiffusoren, som er nedsænket 0,8m under vandets overflade. Lavtryksdiffusoren bliver holdt via snore som sidder fast på gangbroerne som er lavet specielt til forsøget.

Til højre ses et billede af lavtryksdiffusoren (Figur 30) som blev benyttet til forsøgene på Abildvad dambrug.

Dimensioner:

- Rammen 1800mm x 1000 mm
- Der er i alt 7 diffusorrør a 25 mm Ø med en længde på 900 mm der er placeret med 130 mm mellemrum (centrum til centrum)
- 1,2mm hul diameter. Hullerne er boret med 9mm mellemrum
- Indgangsrøret er 63mm Ø



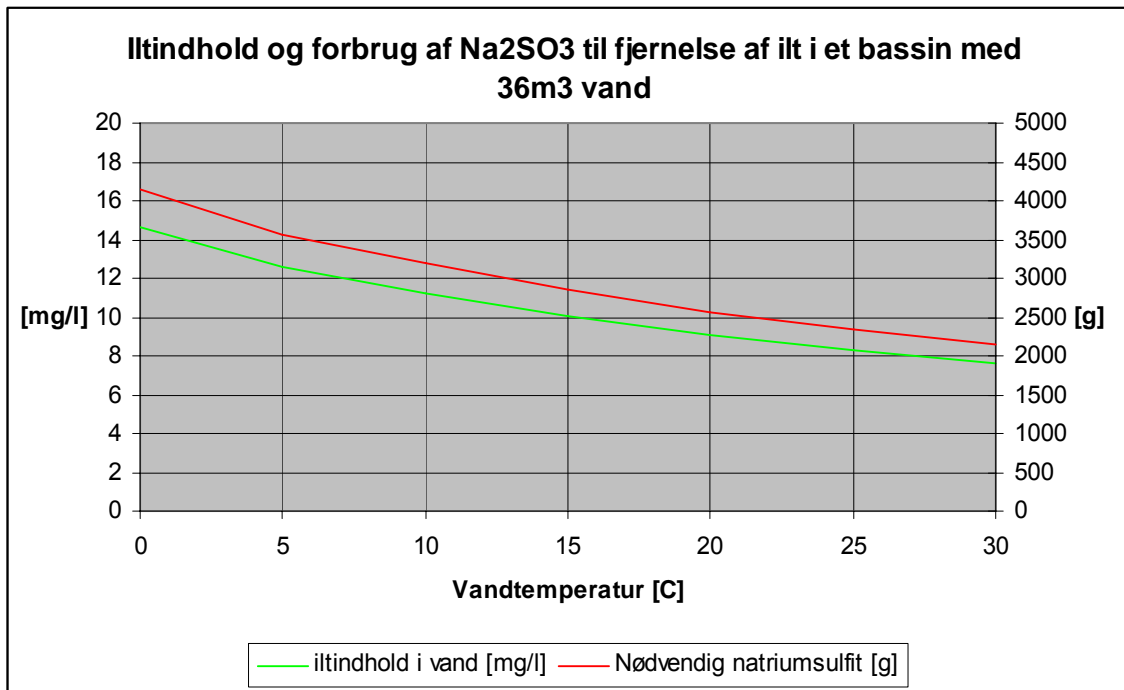
Figur 30 Lavtryksdiffusor fra Christian Jørgensen ApS

### 10.3.2

### Forsøgsbeskrivelse

Inden hvert forsøg blev ilten fjernet fra vandet i opdrætskummen ved at anvende Natriumsulfit ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) som iltfjerningsmiddel. Der blev under processen sørget for omrøring i opdrætskummen. Ved påbegyndelse af forsøgene var iltprocenten i opdrætskummen på 0 - 1 % iltmætning. Ved fjernelse af ilt, skal der minimum anvendes 7,88 mg/l  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  pr mg/l ilt.<sup>6</sup>

Forsøgene viste dog at der i praksis skal anvendes mere natriumsulfit til at fjerne ilten effektivt.



Figur 31 Figuren viser iltindholdet i vand og det teoretiske forbrug af natriumsulfit til at fjerne ilten fra vandet i forsøgskummen som funktion af temperaturen.

Under forsøgene blev luftforbruget målt med en stor bælgmåler der var tilkoblet mellem slangen fra lufttrøret og diffusoren.

For at måle det statiske og dynamiske tryk og var der monteret et målerør, bestående af et lige pvc rør med en længde der var over 10 gange rørdiameteren for at sikre en pålidelig måling. I dette målerør blev et pitotrør placeret.

Itindhold i vandet blev målt i midten af opdrætskummen ved manual aflæsning af iltmåleren.

Der blev under forsøget foretaget iltmålinger flere



Figur 32 Bælgmåler og udstyr.

<sup>6</sup> Teoretisk vandhygiejne kap 6. P. Harremoës m.fl.

forskellige steder i kummen, ved at flytte iltmåleren manuelt og derefter aflæse iltprocenten, dette gav en indikation på at opblandingen i kummen var ensartet.

### 10.3.3 Sammenfatning Abildvad

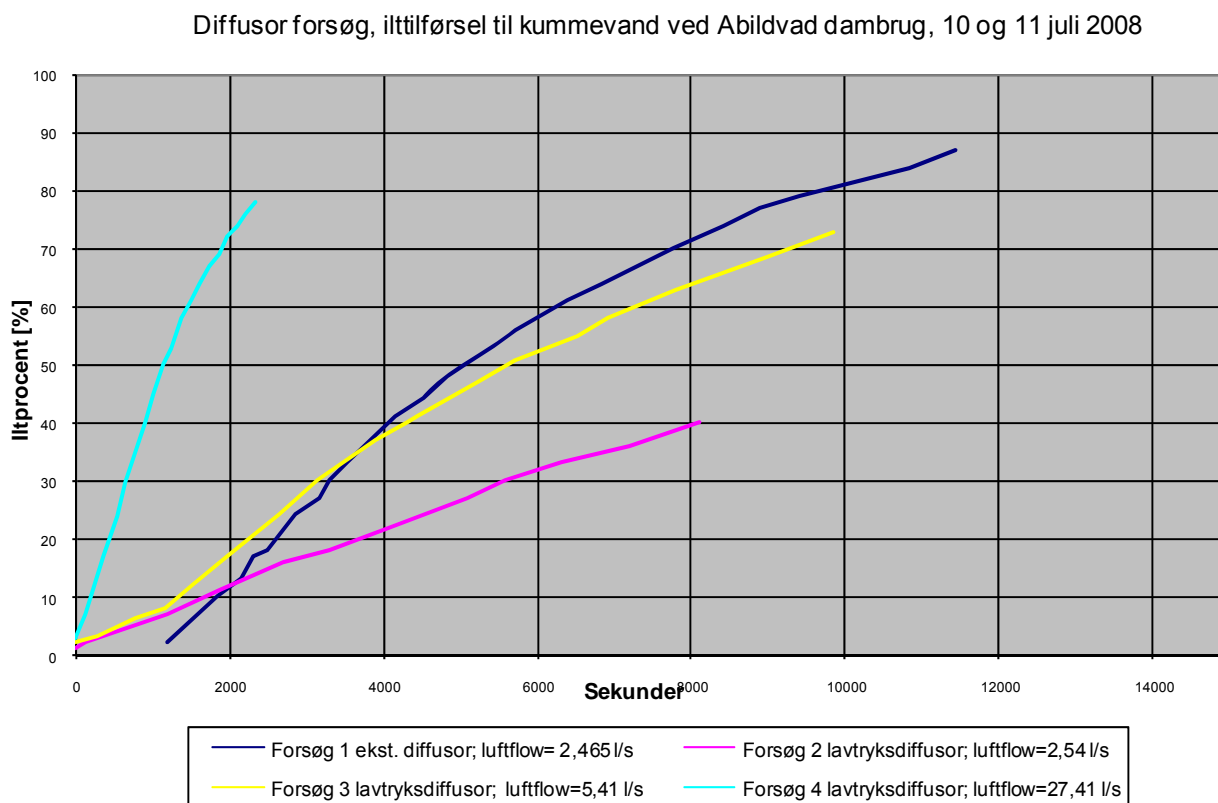
#### 10.3.4 Forsøg 1 (Beluftning med den eksisterende diffusor)

Diffusor beskrivelse: Lineært rør med udvendig perforeret gummistrømpe, ligger på tværs, placeret 50 cm over kummebunden. Se ovenstående beskrivelse af diffusoren.

Vandtemperatur under forsøget blev målt til 11,2 °C

#### 10.3.5 Forsøg 2 til 4 (Beluftning med lavtryksdiffusor ved 3 forskellige luftflow)

Diffusor beskrivelse: lavtryksdiffusor ved ca. 0,85 m dybde og forskellige luftflow: 2,54; 5,41; 27,41 [l/s]

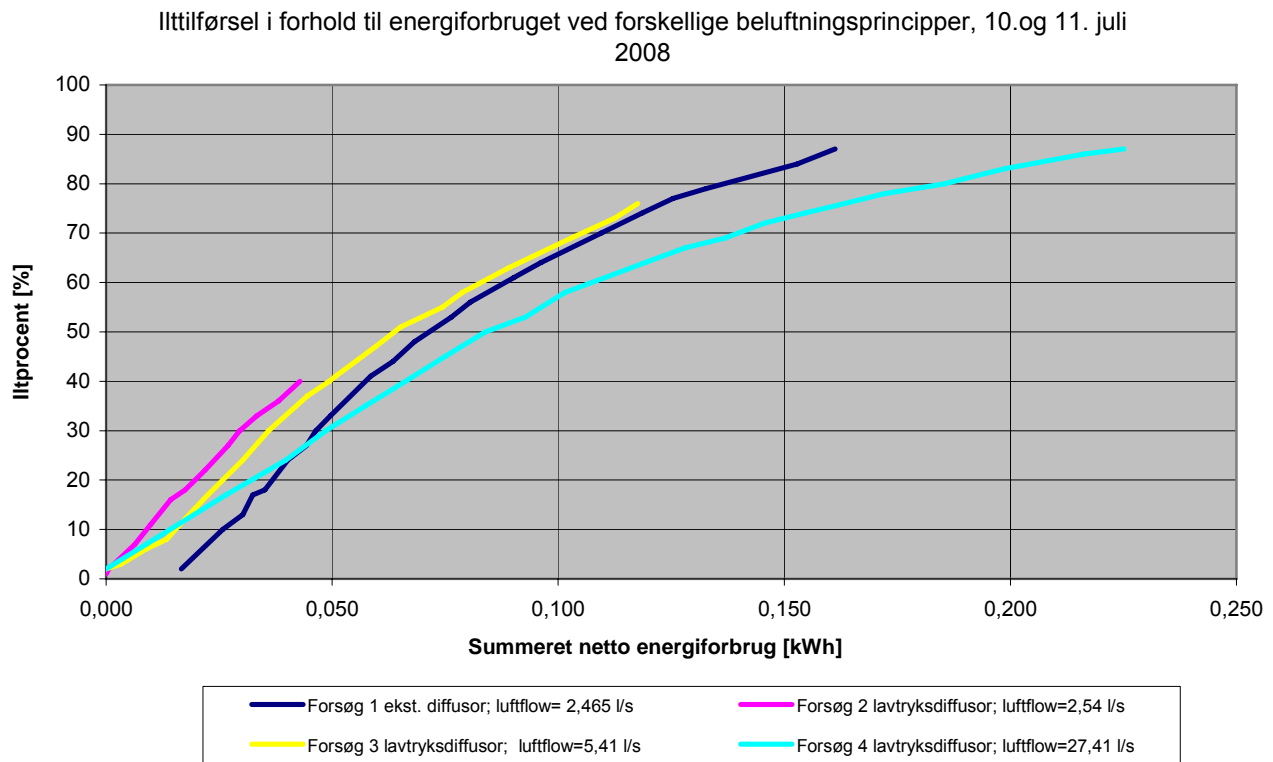


Figur 33 Resultater fra de 4 forsøg med diffusorer foretaget på Abildvad Dambrug

#### Generelle iagttagelser vedrørende lavtryksdiffusoren.

- Lavtryksdiffusoren skal med den nuværende hulfordeling og med 1,2 mm huller placeres meget præcis i vandet for at give en jævn bobledannelse over hele diffusorarealet, den mindste unøjagtighed vil bevirke at der kun er bobledannelse i en enkelt del af diffusoren. Det var ønskeligt om der kunne laves en større udstrømningsmodstand, f.eks. Svarende til 50 mm VS (500 Pa), f. eks. ved overtræk af en perforeret gummistrømpe som der bliver anvendt på de eksisterende diffusore. Det er her forudsat at luftflowet er konstant.

- Forud for hvert forsøg blev ilten fjernet fra vandet vha.  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ , vandet blev udskiftet mellem 2 og 3 forsøg. Det vides ikke om reageret iltfjerningsmiddel kan have en indflydelse på iltmålerens visning.



Figur 34 Beregnet energiforbrug ved diffusor forsøg

## 10.4 Konklusion Abildvad

Forsøgene er gennemført med meget forskellige luftstrømme. Forsøg 1 og 2 er gennemført med samme luftflow og forskellige diffusorgeometrier.

### K1

- Ved lave luftstrømme ses, at effektiviteten af iltilførselen er tilnærmet proportional med vanddybden, det vil sige, at jo højere oppe i vandet luften tilføres, jo større skal luftflowet være, for at tilføre samme iltmængde per tidsenhed. Ved den, i vandsøjlen, højt placerede diffusor er modtrykket mindre hvilket betyder et mindre energiforbrug.
- Der blev ved forsøg med lavtryksdiffusoren opserveret en stigende omrøring i kummen i takt med at luftflowet steg. Ved det sidste forsøg var omrøringen i opdrætskummen så kraftig at det kunne skabe problemer for fiskene under drift og en dæmpning ville være nødvendig.

Nettoenergiforbruget kan beregnes således: luftstrøm [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]\* trykdifferens [ $\text{Pa}$ ]\*tid [ $\text{s}$ ], [ $\text{J}$ ] ved division med 3600000 fås energiforbruget i [ $\text{kWh}$ ] Bruttoenergiforbruget fås ved at dividere med kompressor + motors totalvirkningsgrad.

Denne størrelse er ikke kendt for de specifikke dambrug, men er vigtig for sammenligning mellem de forskellige beluftsmetoder på tværs af flere dambrug.

Der er i forbindelse med beluftsforsøgene ikke undersøgt afgang af frit kvælstof og  $\text{CO}_2$ . Dog er det kendt at afgang hæmmes ved stigende indblæsningsdybde, se kapitel 5

## **K2**

Ved anvendelse af samme lavtryksdiffusor med forskellig luftstrøm ses tydeligt at en stor luftstrøm giver en dårligere iltningseffektivitet end en mindre luftstrøm. Dette må formodes at skyldes:

- Primært en reduceret kontakt tid, som følge af at vandmassen lokalt får en stor opstigningshastighed over diffusoren, som følge af den reducerede middelmassefylde af luft-vandblandingen.
- Sekundært en kombination af skønsvist lidt større luftbobler som følge af sammensmeltning af bobler, hvor store bobler har mindre samlet overfladeareal end små bobler

De forholdsvis få forsøg med lavtryksdiffusoren antyder at en lavtryksdiffusor har en lidt bedre energiøkonomi end en dybt placeret diffusor, hvis der regnes med samme kompressor + motor effektivitet. Der må gøres opmærksom på at lavtryksdiffusoren kræver et større luftflow og kanaldimensioner og en anden type blæser, tilpasset dette arbejds punkt.

- Under forsøgene er vandet opilet i intervallet 0-85 % iltmætning. Forsøget siger således ikke noget om, hvor effektiv lavtryksdiffusoren er ved højere iltmætninger.
- Det forudsættes at luftflowet er indreguleret efter et så lavt luftflow som hensynet til en tilstrækkelig ilttilførsel kræver (afhængigt af fisketætheden og vandtemperaturen, der dog ved tilførsel af grundvand synes ret stabil over året.)



## 11 Forsøg ved Kølkær Fiskeri

På Kølkær dambrug var der mulighed for at benytte et bassin, hvor mammutpumpeprincippet /airlift bliver benyttet.

### 11.1 Formål

Formålet med forsøget på Kølkær dambrug var at undersøge mammutpumpens effektivitet. Det forventes at målingerne kan bruges som grundlag for en saglig vurdering af fordele og ulemper vedrørende mammutpumpens egenskaber til at belufte og transportere dambrugsvand.

### 11.2 Forsøgsbeskrivelse

Returvand fra opdrætskummerne bliver i mammutpumpen opblandet med den tilførte luft og stiger op gennem brønden. Den drivende kræft i en mammutpumpe er forskellen i massefylde mellem vand på den ene side og vand/luft blandingen på den anden side. Vand/luftblandingen, ses som hvidt skum på billederne (**Figur 35** og **Figur 36**)

Iltindholdet og temperatur i vandet blev målt ved indløbet til mammutpumpen inden opblanding med luft se **Figur 37**, disse målinger blev foretaget hvor der på skitsen står ”Brønd”.

Iltprocent og temperatur i vand/luft blandingen blev målt lige under overfladen i pumpen samt efter skumzonen. (Se billede nedenfor, opblanding ses tydeligt i form af hvidt skum), Vandhastigheden blev målt efter at vandet havde passeret et måleunderløb i form af tværgående plade. Dette måleunderløb sikrer at vandet er mindre turbulent og dermed reduceres usikkerhed ved vandhastighedsmålingen.

Der blev udført målinger på den luftstrøm der blev blæst ind i gruben ca. 4 m under vandspejlet. Temperatur, tryk og hastighed i luftrøret blev målt på en udvalgt rørstrækningen, således at der var mindst mulig måleusikkerhed. Der blev boret et hul i luftrøret således at et lille vingehjul kunne komme igennem og lufthastigheden kunne blive målt. Som kontrol af denne måling blev det dynamiske tryk målt vha. en pitotrørsmåling. Pitot røret blev forbundet med et manometer, der kan vise små differenstræk, men tåle store statiske tryk, Dwyer M 700 Pa. Den tilførte lufts statiske tryk blev målt i mVs ved hjælp af en vandfyldt slange forbundet pitotrøret. En silikoneslange blev fyldt med vand og hængt op i 5 m højde, det statiske tryk blev målt som højdeforskellen på vandsøjlerne i den U-formede slange.



Figur 35 Mammutpumper / airlifts på Kølkær Dambrug



Figur 36 Mammutpumper / airlifts på Kølkær Dambrug mammutpumpen der laves målinger ved.

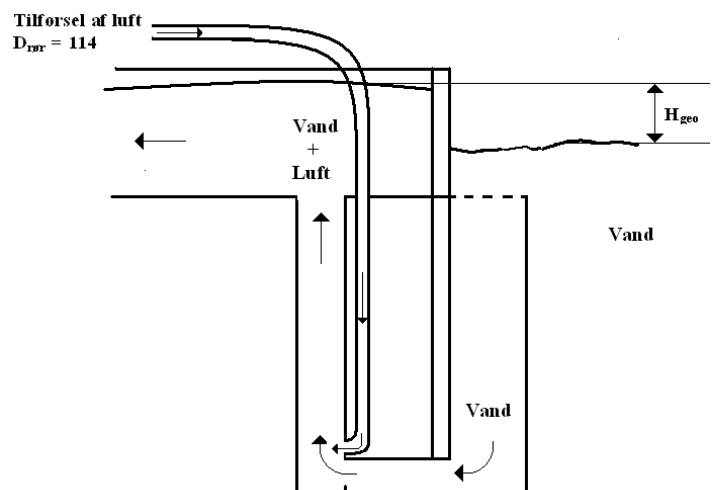
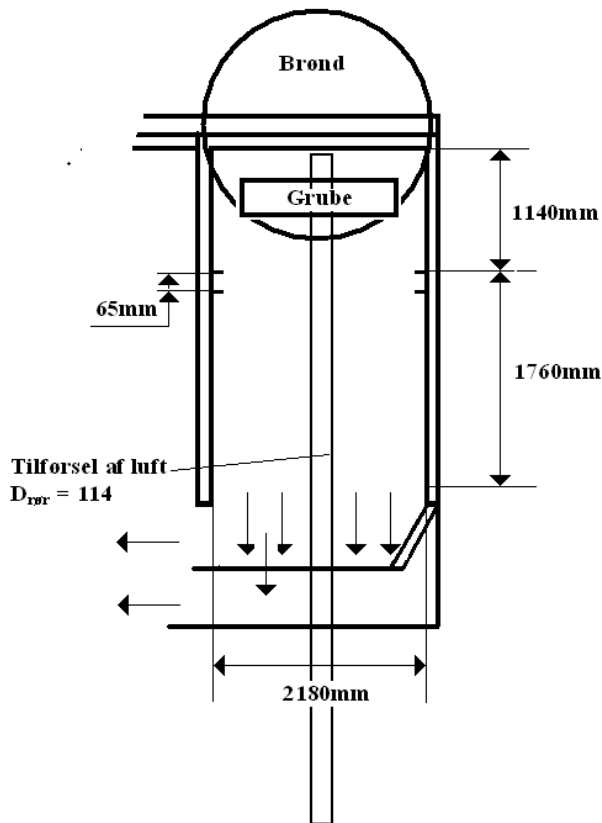
**Målingerne inkluderer vand og tilført luft følgende:**

**Vand**

- Hastighed før og efter (vingehjul)
- Iltindhold før og efter (Oxyguard)
- Temperatur før og efter (K-tråd + eltek 1000 datalogger)
- mVs (et rør bliver sat ned i opblandingen lige over gruben og vandstanden bliver målt med tommelstok)

**Luft**

- Temperatur (K-tråd+ eltek 1000 datalogger)
- Statisktryk (pitotrør + manometer, 5m lodret slange med vand)
- Dynamisktryk/ hastighed (pitotrør + manometer / varmetrådsanemometer / vingehjul)
- Iltindhold (Oxyguard / røggasmåler)



Figur 37 Skitse med dimensioner af mammutpumpen.

Figur 38 Principdiagram af mammutpumpen set fra siden





### Beregning af luftkompressor ud fra målte data

Til beregningerne er der brugt Poissons ligninger:

$$T_2/T_1 = (V_1/V_2)^{\kappa-1} = (p_2/p_1)^{(\kappa-1)/\kappa}$$

Målt	Kappa	1,4		
Tabel	Cp	1	kJ/(kgK)	
Tabel	Atm. tryk p0	1,013	bar	
Målt	Temp. efter kompressor t1	74	C	
Målt	Tryk efter kompressor p1	1,436	bar	
Målt	Aktuel luftstrøm	471,5	m <sup>3</sup> /h	
Beregnet	Luftstrøm ved 0C + 1,013 bar	525,8	m <sup>3</sup> /h	
Beregnet	Massefylde ved 0C	1,293	kg/m <sup>3</sup>	
Beregnet	Massestrøm	679,942	kg/h	
Beregnet	Massestrøm, m	0,189	kg/s	
Antaget	Start temp. t0	20,000	C	
Beregnet	Konstant	291,921		(273 + T0) x p0 <sup>1/(κ-1)</sup>
Beregnet	Temp. Uden kompressortab, T2	323,718	K	(Konstant / p1) <sup>1/(κ-1)</sup>
Beregnet	T2	323,718	K	(273+t0) x (p0/p1) <sup>((1-1,4)/1,4)</sup>
Beregnet	t2	50,718	C	
Beregnet	Teoretisk min. forbrug	5,802	kW	Cp x ( t2-t0) x m
Beregnet	Forbrug ekskl. varmetab fra motor og kompressor	10,199	kW	m x Cp x (t1-t0)

#### 11.3.1 Energibetragtninger

Forsøgene på Abildvad og Kølkær har omfattet ret forskelligartede dambrug med hensyn til de metoder der anvendes til at transportere og belufte vandet, i denne sammenfatning er forsøgene fra Abildvad også inddraget.

I Kølkær anvendes mammutpumpeprincippet til både at transportere og ilte vandet. Dette system indebærer en elforbrugende proces

- Luftkompressor

Den termodynamiske beregning af luftkompressionen viser at det koster en del energi at komprimere luft. Den faktiske målte temperaturstigning viser tillige at der i denne kompressor er et betydeligt ekstra energitab.

En typisk pumpe til transport af store vandmængder ved en lille løftehøjde (max 0,4m) er en dykket propelpumpe med en totalvirkningsgrad,  $\eta_{total} = 0,4$ . Denne type pumpe ville kunne udføre pumpearbejdet pr mammutpumpe i Kølkær for et energiforbrug på  $Q \times dp / \eta_{total}$ .

$$Q = 1300 \text{ m}^3/\text{h} = 0,362 \text{ m}^3/\text{s}, dp = 0,25 \text{ mVs} = 2500 \text{ Pa.}$$

Forventet elforbrug til flytning af vand	= 0,362 x 2500 / 0,4 = 2260 W
Faktisk elforbrug af kompressorluft til en mammutpumpe	= 5802 W
Det målte energiforbrug ud fra opvarmet luftstrøm	= 10199 W

I regnearket herunder er der estimeret en årlig besparelse, hvis mammutpumperne i Kølkær erstattes af en propelpumpe til flytning af vand kombineret med kummebeluftning som hos Abildvad.

<b>Kølkær i dag:</b>		
Målt vandcirkulation pr. mammutpumpe	1314	m <sup>3</sup> /h
Målt vandcirkulation pr. mammutpumpe, l/h	1314000	l/h
Iltindhold i vand før mammutpumpe	64	%
Iltindhold i vand før mammutpumpe, mg/l	7,04	mg/l
Iltindhold i vand efter mammutpumpe	87	%
Iltindhold i vand efter mammutpumpe, mg/l	9,57	mg/l
Ilt optaget i vand	2,53	mg/l
Ilt optaget i vand pr. time	3324420	mg/h
Tilført luft pr. mammutpumpe	521	Nm <sup>3</sup> /h
Iltindhold i atmosfærisk luft	261	mg/l
Tilført ilt via atmosfærisk luft	135981000	mg/h
Udnyttelsesgrad af luftens ilt	2,4	%
<b>Abildvad</b>		
Opnået iltmætning med eksisterende diffusor	80	%
Opnået iltmætning med eksisterende diffusor, mg/l	8,8	mg/l
Tilført luft ved forsøg	23.418	liter
Tilført ilt ved forsøg	6.111.968	mg ilt
Vandvolumen	36.000	liter
Optaget ilt ved forsøg	316.800	mg ilt
Udnyttelsesgrad af luftens ilt	5,2	%
Luftbehov ved Kølkær ved samme udnyttelsesgrad som hos Abildvad	246	Nm <sup>3</sup> /h
Teoretisk effektbehov, uden varmetab	2,7	kW
Teoretisk effektbehov til flytning af vand	2,2	kW
Samlet effektbehov	4,9	kW
Nuværende teoretiske effektbehov	5,8	kW
Besparelse pr. mammutpumpe	0,9	kW
Årlig driftsbesparelse v. 4 mammutpumper	30.287	kWh/år
Årlig driftsbesparelse v. 4 mammutpumper, kr/år	21.201	kr/år
Årlig driftsbesparelse i % af samlet energiforbrug	4,3	%

### Sammenfatning

- at energiforbruget til en 4 m dykket mammutpumpe er meget højt
- at en del af den geometriske løftehøjde mistes lige ved udløbet fra mammutpumpen
- At en neddykket propelpumpe vil kunne præstere løftehøjden (men ikke beluftningen) med et energiforbrug på 25 % af det nuværende
- Propelpumpeløsningen vil kræve at vandet beluftes ved hjælp af en anden energieffektiv metode.
- At kapselblæsernes effektivitet tillige er dårlig afsløres af den store temperaturstigning der væsentligt overstiger det termodynamisk forventede.

### 11.3.2 Abildvad

I Abildvad anvendes centrifugalpumper til at hæve vandet ca. 0,5m, det der skal til at opnå den ønskede vandcirkulation. Denne løftehøjde skyldes at dambruget har fået efterinstalleret et biofilter, det var af praktiske årsager ikke muligt at placere filteret anderledes, hvilket har medført denne ekstra løftehøjde. Beluftningen sker primært ved hjælp af et lige rør, placeret i ca. 1,5 m dybde i opdrætskummerne, hvis indblæsningsrør er overtrukket med en perforeret gummistrømpe.

Dette system indebærer to forskellige elforbrugende processer

- Vandpumpe
- Luftkompressor

Mammutpumpens effektivitet er meget lav og bruger i det aktuelle tilfælde 4,5 gange så meget energi som en veldimensioneret aksialpumpe ville bruge.

Mammutpumpens iltningseffektivitet er energimæssigt i sammenligning overslagsmæssigt kun halvt så effektivt som det aktuelle oprindelige beluftningsprincip i Abildvad var. Her anvendtes et lige rør på tværs af bassinet overtrukket med en gummistrømpe.

Årsagen må vurderes at være de store bobler kombineret med den lave kontakt tid.

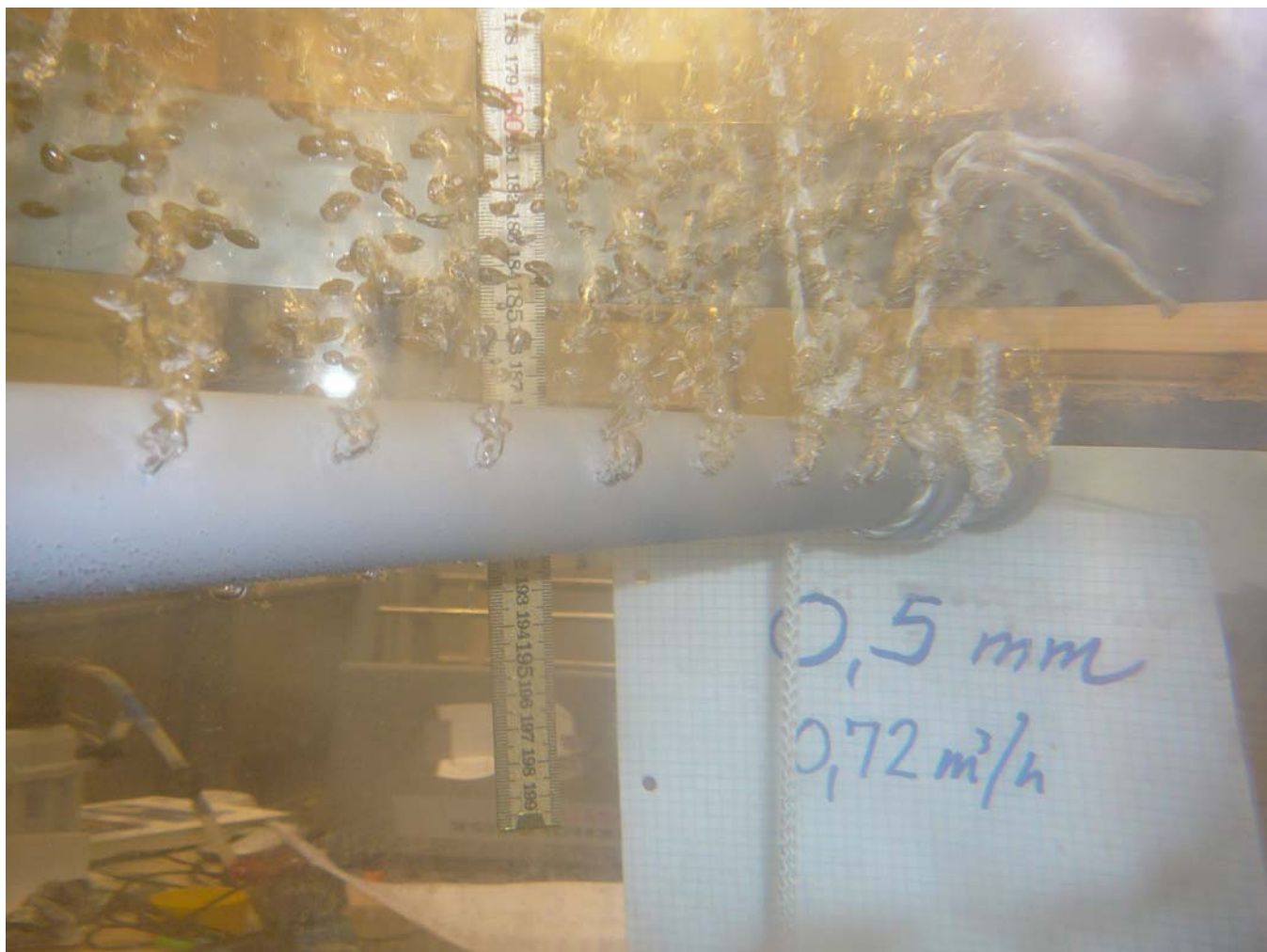
Tillige antyder de mange luftkanalforbindelser ud over området, at der lokalt tilføres ekstra luft.

## 12 Rapport Laboratoriedel,

Vedr.: Beluftsingsforsøg i laboratorium ved indblæsning af luft med et rørarrangement



Figur 39 forsøgstank med diffusor, 0,81 m under vandspejl



Figur 40 forsøgsopstilling 2 diffusorer med 0,5 mm huller

### 12.1.1 Formål med forsøgene: at finde årsager til energiforbrug på dambrugene

Tidligere i rapporten er de forskellige metoder til beluftning som anvendes i dag beskrevet. I det følgende er det ved forsøg undersøgt, hvor stor betydning forskellige faktorer har på energieffektiviteten af beluftningen. Formålet er at belyse nogle af de faktorer, der har betydning for energiforbruget til beluftning af dammene hvordan beluftning af dambrugsdammene kan gøres mere effektivt. Betydningen af følgende faktorer er undersøgt:

- Hulstørrelse og hul-udformning i diffusorer
- Opstigningshastighed af bobler
- Boblestørrelse
- Diffusorens placering dybt / lavt i vandet
- Luftmængder.

#### Emner der behandles er:

Energiforbrug til at opnå en given iltoverførsel til vandet ved bobling af luft gennem vandet. Der blev søgt kilder der belyser følgende emner.

- Opstigningstid = kontakttid luftboble i vandfase
- Nødvendigt lufttryk i det neddykkede diffusorrør.
- Diffusordybde = nødvendig minimums lufttryk
- Opstigning af vand i beluftningsfeltet
  - Reducerer kontakttid mellem vand og luft
  - Skaber omrøring i bassinet
- Boblestørrelse
- Samlet bobleoverfladeareal
- Selvrensning af huller i diffusor
- Vandtemperatur
- Tryktab over udstrømningshuller
- Jævnhed af luftudstrømning over udstrømningsareal.

### 12.1.2 Forsøgsbeskrivelse vedr. bobleforsøg.

Følgende forsøg blev gennemført:

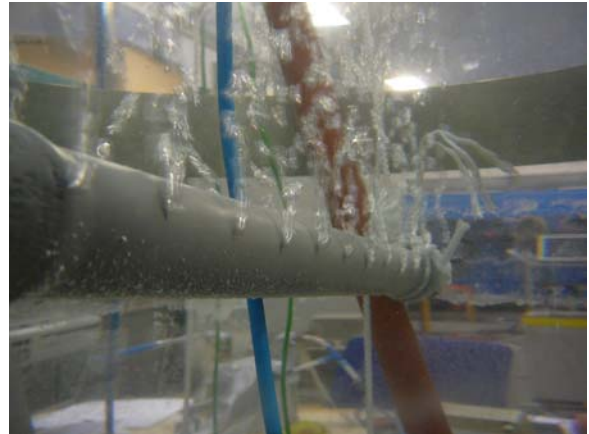
	Enhed	1	2	3	4	5
Type		Rør med huller	Rør med huller	Rør med huller	Kvadrat med rør i midten	Rør med strømpe
Rørdimension	[mm]	32	32	32	32	50
Hulstørrelse i rør	[mm]	0,5	0,5	1,2	0,5	5
Antal hulrækker		2	2	2	*	1
Huller pr række		12	12	13	*	8
Hulafstand	[mm]	42	42	26	*	40
Afstand til overflade	[mm]	800	800	810	810	820
Afstand til bund	[mm]	1000	1000	990	990	980
Gennemsnitlig målt luftstrøm	[l/s]	0,1	0,201	0,2	0,199	0,195
Statisk tryk	[pa]	9400	13800	8300	8600	11150
Boble opstigningshastighed	[m/s]	0,33	0,33	0,4	0,3	0,349

\* Se beskrivelse nedenfor under forsøg 4



### 12.1.3 Forsøg 1, 2 og 3

Ved de tre første forsøg blev der benyttet et enkelt rør med to rækker huller som vist på billedet til højre



Figur 41: forsøgsopstilling 2 med 0,5 mm. huller

Forsøg 4:

Kvadrat med rør i midten

Dimensioner:

- Antal huller Ydre omkreds = 37
- Antal huller Indre omkreds = 40
- Længde = 420mm
- Bredde = 430mm
- Diagonal = 570mm

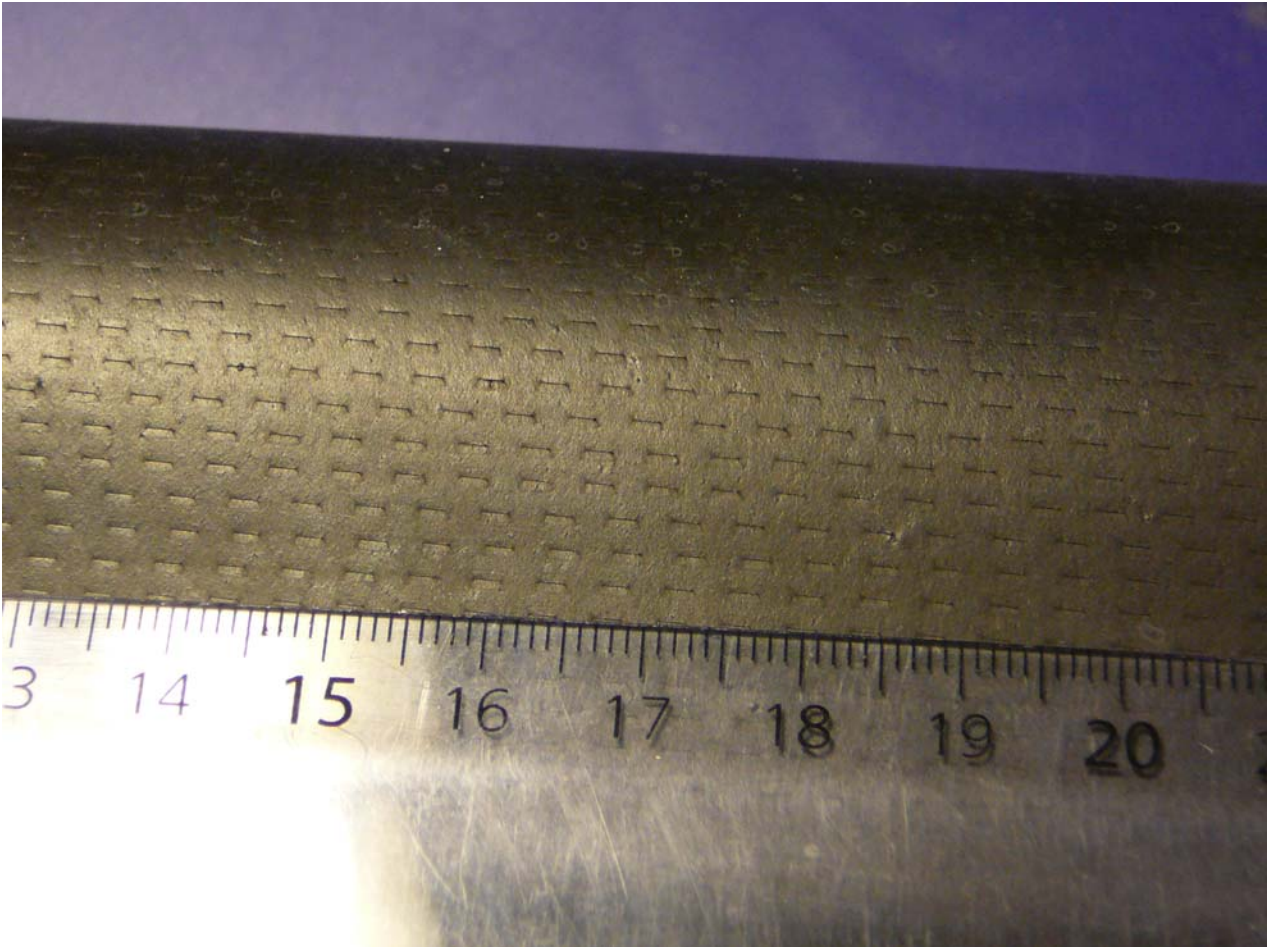


Figur 42: forsøgsopstilling 4 med perforeret gummistrømpe

### 12.1.4 Forsøg 5

Pvc-rør med perforeret gummistrømpe

røret var overtrukket med en perforeret gummistrømpe identisk med den der benyttes i Abildvad dambrug. Strømpen sad løst på pvc-røret men dette burde ikke give nogen forskel i forhold til en tætsiddende strømpe, da den bliver blæst op under forsøget.



Figur 43 Nærbillede af den perforerede gummistrømpe bemærk de aflange perforeringer på lidt under 2mm.



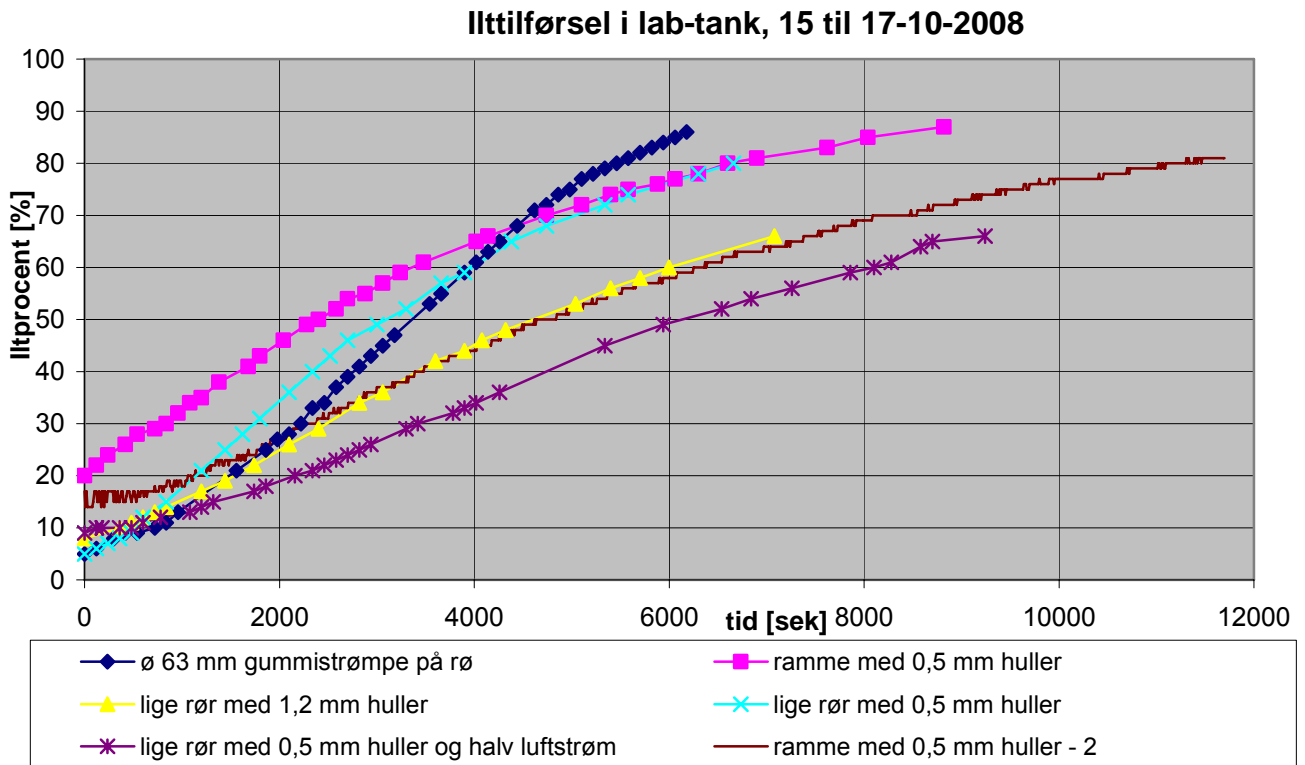
Figur 44 Rør med perforeret gummistrømpe



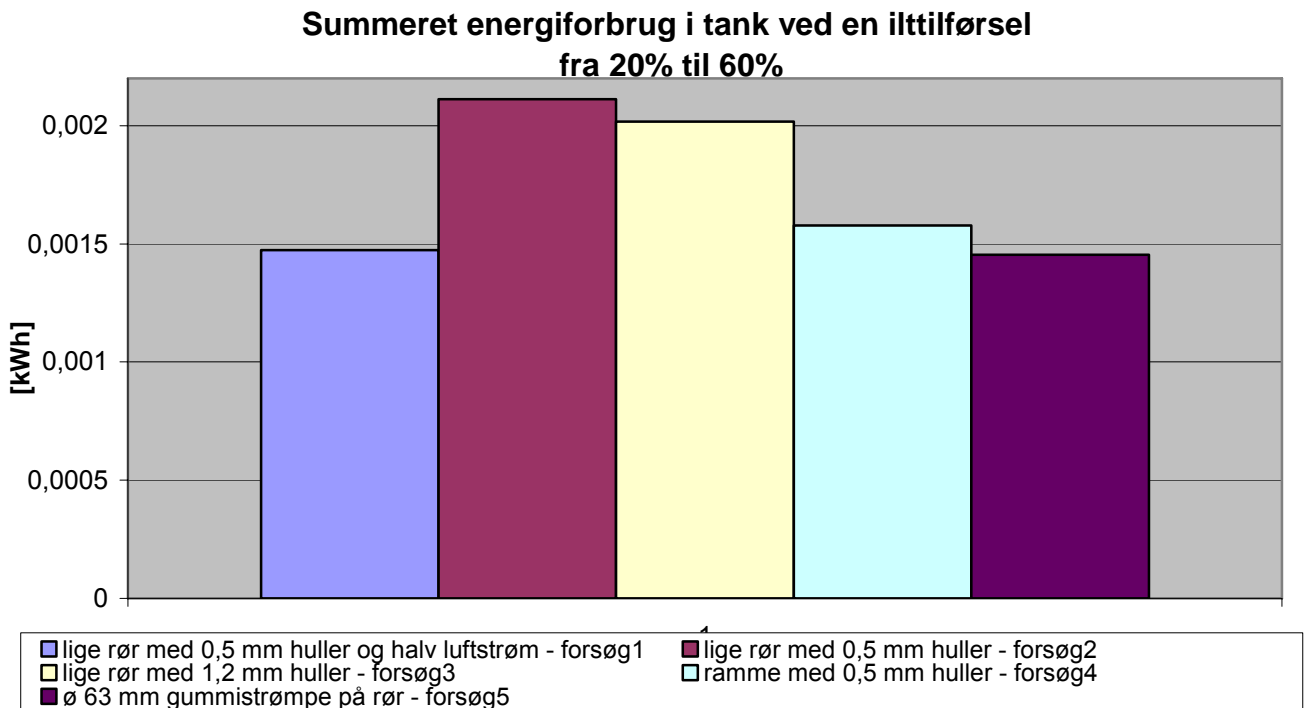
Figur 45 Rør med perforeret gummistrømpe under forsøg

### 12.1.5 Resultater

For at gøre tankforsøgene sammenlignelige ses der på energiforbruget i ilttilførselsintervallet observeres fra og med 20 % til og med 60 % dette interval blev valgt, da der ved denne iltmætning observeres en høj opiltningshastighed. Overskydende iltfjerningsmiddel kan nå at reagere inden måleprogrammet igangsættes.



Figur 46: Opnået iltmætning over tid i forsøgstank.



Figur 47: Summeret energiforbrug i forsøgstank ved anvendelse af forskellige diffusorgeometrier. Undersøgt ved en iltmætning fra 20 % til 60%.

## 12.2 Konklusion / sammenfatning.

De praktiske forsøg på Dambrugene samt overslagsmæssige beregninger lod formode, at beluftningseffektiviteten er meget afhængig af valgte diffusor geometri. Der blev derfor udført mere systematiske forsøg i en gennemsigtig tank på Teknologisk Institut.

Der er i alt udført forsøg med 5 forskellige geometrier af beluftningsarrangementet i en tank. Formålet er at belyse faktorer, der har betydning for energiforbruget. Alle beluftningsarrangementerne er meget lig dem der anvendes i praksis på dambrugene. Forsøgene er forbundet med nogen usikkerhed, men viser dog klare tendenser.

Forsøgene viser at energiforbruget til beluftning afhænger markant af beluftningsprincippet og at det er værd at arbejde videre med.

Ved samme iltningseffektivitet havde det bedste arrangement et energiforbrug, der kun var på 68 % af den ”dårligste” afprøvede løsning.

## Erfaringer / konklusioner

### *Observation*

- En lille luftstrøm giver en bedre beluftningseffektivitet i forhold til energiforbruget end en stor luftstrøm gennem samme armatur.
- Store huller (1,2 mm) giver lidt dårligere beluftningseffektivitet end små huller (0,5) mm
- En jævn fordeling af beluftningen over et større areal (ramme med huller) er bedre end beluftning med tilførsel af samme luftstrøm fra et lineært rør.
- Beluftning ved hjælp af et lineært rør overtrukket med en gummistrømpe er bedst af de gennemførte forsøg.
- Visuelt vurderet gav den snittede gummistrømpe de fineste bobler, hvilket med stor sandsynlighed er årsagen til den gode effektivitet.
- Opstigningshastigheden er ligger på ca. 0,33 - 0,4 m/s ved de aktuelle forsøg. Dvs. ved 0,8 m vanddybde er opstigningstiden = 2,4 sekunder.
- En stor luftstrøm koncentreret tilført øger opstigningen af den vandsøjle der indeholder luftboblerne og øger dermed opstigningshastigheden.
  
- Ikke gennemført. En ramme overtrukket med strømper, kunne være en endnu bedre løsning.

### Forudsætning for beregningerne

- Det forudsættes at kompressorernes energiforbrug falder i takt med luftydelse og modtryk.

## Praktiske forhold vedrørende diffusorer af typen med små huller i kanalsider.

Man skal være meget omhyggelig med at justere en ramme (”lavtryksdiffusor”) så præcis vandret, at der kommer luft ud gennem alle huller grundet det lave tryktab over hullerne. Ved for stor afvigelse, vil al luft strømme ud i en koncentreret opadstigende ”geyser” gennem den højest beliggende ende af røret, og et væsentligt effektivitetstab kan forventes.

Gummistrømpens huller er 2-3 mm lange lukkede skæringer, der først åbner sig lidt når der sættes tryk på. Systemet formodes at give en god selvrensningsevne af udstrømningshuller

Firmaet Christian Jørgensen ApS frarådede i stive rør at bruge huller under 1,2 mm i diameter af hensyn til risikoen for tilstopning. TI har ingen erfaringer desangående, men kan dog tilføje at; Hvis der indblæses med sænket vandstand i bassin under diffusorniveau vil det fulde lufttryk ligge over hullerne, hvilket vil øge chancen for at snavs kan blæses ud. Dog kan udfældning af uorganiske forbindelser være mere problematiske. På dambrug kan dette oftest løses ved at tilsætte en svag saltsyre opløsning gennem luftrøret.

## 13 Sammenfatning og konklusion

Der findes omkring 250 danske ferskvandsdambrug hvoraf omkring 200 drives som traditionelle dambrug med varierende grader af elforbrugende udstyr. Traditionelt er disse dambrug blevet drevet som gennemstrømningsanlæg med ved vandindtag over stemmeværk. Energiforbruget på disse anlæg har været begrænset til små pumper og andet udstyr der anvendes i forbindelse med flytning af fisk og oprensning af damme.

Med modeldambrugsbekendtgørelsen er det blevet muligt at forøge produktionen ved at ombygge et dambrug og blive miljøgodkendt som modeldambrug. Dette har betydet at en række danske ferskvandsdambrug er blevet moderniseret. For modeldambrugene gælder dambrugsbekendtgørelsens krav til fodersammensætning udledning og foderkoefficient.

I forbindelse med modeldambrugsbekendtgørelsen er der anvist 3 mulige modeller. I praksis er der kun blevet anlagt type 1 og 3 dambrug. Forskellen ligger i maksimalt tilladeligt vandforbrug og intensiteten af vandrensningen. Modeldambrug type 3 anvender biofiltre. Modeldambrugene benytter sig således af recirkuleringsteknologi.

Recirkulerende fiskeopdræt er afhængige af at tilføre ilt, idet friskvandsforsyningen ikke længere er tilstrækkelig til at sikre et passende iltniveau. Derudover er de recirkulerende fiskeopdræt afhængige af at afgasse primært CO<sub>2</sub> og N<sub>2</sub> fra vandet. Iltning og afgassing af vand foregår ved hjælp af forskellige teknologier:

- overfladebeluftere
- rislefiltre
- lavtryksdiffusorer
- kummebeluftere
- mammutpumper / air lifts
- tilsætning af ren ilt
- tilsætning af ren ilt via iltkegler
- ReOx metoden
- U-rør metoden / deep shaft

På baggrund af teori om gassers opløselighed i vand kan følgende udledes:

- Gassers opløselighed – og dermed vandets mætningskoncentration - stiger med trykket. Det vil i praksis sige, at vand under tryk / dybt vand kan indeholde mere ilt og samtidig mere CO<sub>2</sub> end ved overfladen.
- Jo større kontaktflade der er imellem gas- og vandfase, jo hurtigere kan gassen opløses i vandet
- Jo længere koncentrationen er under/over mætningskoncentrationen i vandfasen, jo hurtigere kan gassen opløses/afgasses

### 13.1.1 Afgrænsning af projektet

Der blev foretaget en prioritering på baggrund af de teoretiske betragtninger og på baggrund af sammenligning mellem energinøgletal og benchmarking omkring teknologivalg hos de fiskopdræt, som har deltaget i projektet. Prioriteringen var at undersøge følgende:

- Iltning:
  - Energivurdering af metode til iltning med flydende ilt i iltkegler – herunder ReOx. Der er foretaget teoretisk beregning for at finde ud af, hvor energieffektiv en løsning ReOx er.
  - Iltkegler: Energiforbruget til indløsning af ren ilt i iltkegler er undersøgt hos åleproducenterne, hvor denne løsning typisk vælges
  - Erfaringerne med anvendelse af deep shaft hos et åleopdræt er kort beskrevet.
- Mammutpumpeprincippet: ret almindeligt brugt i branchen til beluftning / iltning / afgasning og samtidig flytning af vand.
  - Princippet undersøges ved forsøg i laboratorium
- Pumper: især i ålebrugene fylder energiforbruget til pumpning meget i det samlede energiregnskab. Typisk 60-80 % af energiforbruget. Følgende er undersøgt vedr. pumper:
  - Rentabilitet af at udskifte pumper til nye pumper hos Lyksvad – eksempel
  - Betydningen af coatede pumper
- Diffusorer: Energivurdering af forskellige måder at anvende luft-diffusorer på. Det er undersøgt i laboratorium og ved forsøg i dambrugsbassin, hvor effektive forskellige diffusorer er til at ilte vandet i dambrugsbassinet.
 

Herunder:

  - Lavtryksdiffusor
  - Diffusor-rør med såkaldt ”gummistrømpe”
  - Betydningen af små og store huller i diffusor-rør
  - Betydningen af boblehastighed / volumenstrøm af luft
  - Betydningen af diffusorens placering (dybt/lavt)

### 13.1.2 Konklusioner fra skrivebordsundersøgelser

#### **Indløsning af ren ilt i iltkegler – herunder anvendelse af ReOx og deep shafts:**

- Det er især hos åleproducenterne at der indløses ren ilt i iltkegler. Sammenligning mellem åleproducenterne tyder på, at det der umiddelbart har størst betydning er, hvor stor en andel af den samlede vandmængde, der skal føres gennem iltkeglerne og dermed trykforøges.
- Anvendelse af ReOx metoden medfører et mindre forbrug af ilt på grund af mere effektiv indløsning af ilten. Det er tvivlsomt at det er rentabelt at indføre ReOx på de fleste eksisterende åleanlæg. Det skyldes, at der skal laves om på eksisterende rørføring. Ved estimat på et typisk, eksisterende åleopdræt med en intern vandføring på ca. 2.500 m<sup>3</sup>/h, bliver den samlede årlige driftsbetegnelse på ca. 160.000 kr. Derudover må det forventes at investering og vedligehold af pumper vil blive lavere pr. år, da der anvendes mindre

pumper. Dermed bliver ReOx en attraktiv løsning ved nyanlæggelse eller gennemgribende reovering

- Deep shaft: Konklusionen på undersøgelsen er, at der er et væsentligt energisparepotentiale i forbindelse med driften, men der er en del praktiske udfordringer ved at anvende metoden, og det er vanskeligt og bekosteligt at bygge ind i et eksisterende anlæg. Deep shaften kan konstrueres, så den kræver et minimum af energi i drift. Løsningen er attraktiv ved nyetablering, hvis de nødvendige godkendelser fra myndighederne kan opnås

### **Rentabilitet af pumpeskift:**

- Som eksempel blev der beregnet rentabilitet af pumpeskift i anlæg 700 hos Lyksvad Fiskefarm. Resultatet af beregningen er, at der er en tilbagebetalingstid på ca. 4,7 eller 4 år og 8 måneder.

### **Coating af pumper:**

- Målinger hos en åleproducent, tyder på at eksisterende pumpe ydelse er væsentligt lavere end forventet ud fra den teoretiske pumpekurve fra leverandøren. Det er muligt at der sker en væsentlig tæring af pumpen under brug. Ved målinger på ny og gammel pumpe i et af åleanlæggene var den målte ydelse for den nye og gamle pumpe er den samme. Det er ikke muligt på baggrund af undersøgelsen at konkludere entydigt, om hel eller delvis coating af pumper er en rentabel idé, da der er usikkerhed om hvad den målte lave pumpeydelse reelt skyldes. Dette bør således undersøges nærmere. Hvis det vælges at coate pumpehjul og/eller –hus vurderes det dog, at dette bør gøres ved anskaffelsen, da det er for dyrt og besværligt at coate en gammel pumpe og sætte den tilbage i anlægget igen.

### **Luftbehov og effektivitet af blæsere:**

- Der er udført målinger og beregninger på 2 kapselblæsere hos Lyksvad Fiskefarm med henblik på vurdering af, om det er rentabelt at udskifte blæserne. Målingerne tyder på, at slid på de gamle kapselblæsere ikke har haft negativ betydning for hvor meget luft blæserne leverer pr. kWh ved det aktuelle modtryk. Derfor konkluderes det, at det ikke vil være rentabelt at udskifte de gamle blæsere til nye. Der findes i øjeblikket ikke andre blæsertyper, som kan erstatte kapselblæseren, da modtrykket er for stort til at en radialblæser kan klare opgaven.
- Det er kun ca. 10 % af det samlede modtryk i anlægget, som ligger i rørstrækningen. De sidste 90 % ligger i modtryk fra vandsøjlen og i diffusorer. Eksemplet indikerer dermed, at det sandsynligvis er i indstillingen af luftflow, valg af beluftningsprincip, vanddybde og diffusorvalg hvor muligheden for energibesparelse er størst.

## **13.1.3 Konklusioner fra forsøg i dambrugsbassin**

### **Abildvad**

På Abildvad dambrug blev udført 4 forsøg i en opdrætskumme uden fisk:

1. Det eksisterende beluftningsprincip. Luftstrømmen ved forsøget er den samme som normal drift. luftstrømmen blev målt til  $q_{eks} = 2,47$  l/s
2. Beluftning via lavtryksdiffusor der er placeret 0,8m under vandoverflade med et luftflow på  $q_{tid1} = 2,54$  l/s.



3. Beluftning via lavtryksdiffusor der er placeret 0,8m under vandoverflade med et luftflow på  $q_{\text{itd2}} = 5,41$  l/s.
4. Beluftning via lavtryksdiffusor der er placeret 0,8m under vandoverflade med et luftflow på  $q_{\text{itd2}} = 27,41$  l/s.

Ved lave luftstrømme ses, at effektiviteten af ilttilførselen er tilnærmet proportional med vanddybden, det vil sige, at jo højere oppe i vandet luften tilføres, jo større skal luftflowet være, for at tilføre samme iltmængde per tidsenhed. Ved den, i vandsøjlen, højt placerede diffusor er modtrykket mindre hvilket betyder et mindre energiforbrug.

Der blev ved forsøg med lavtryksdiffusoren observeret en stigende omrøring i kummen i takt med at luftflowet steg. Ved det sidste forsøg var omrøringen i opdrætskummen så kraftig at det kunne skabe problemer for fiskene under drift og en dæmpning ville være nødvendig.

Ved anvendelse af samme lavtryksdiffusor med forskellig luftstrøm ses tydeligt at en stor luftstrøm giver en dårligere iltningseffektivitet end en mindre luftstrøm. Dette må formodes at skyldes:

- Primært en reduceret kontakt tid, som følge af at vandmassen lokalt får en stor opstigningshastighed over diffusoren, som følge af den reducerede middelmassefylde af luft-vandblandingen.
- Sekundært en kombination af skønsvist lidt større luftbobler som følge af sammensmeltning af bobler, hvor store bobler har mindre samlet overfladeareal end små bobler

Under forsøgene er vandet opiltet i intervallet 0-85 % iltmætning. Forsøget siger således ikke noget om, hvor effektiv lavtryksdiffusoren er ved højere iltmætninger

De forholdsvis få forsøg med lavtryksdiffusoren antyder at en lavtryksdiffusor har en lidt bedre energiøkonomi end en dybt placeret diffusor, hvis der regnes med samme kompressor + motor effektivitet. Der må gøres opmærksom på at lavtryksdiffusoren kræver et større luftflow og kanaldimensioner og en anden type blæser, tilpasset dette arbejds punkt.

### **Kølkjær Fiskeri**

På Kølkjær Fiskeri blev udført målinger på mammutpumpeprincippet. Der blev målt på den luftstrøm der blev blæst ind i gruben ca. 4 m under vandspejlet. Temperatur, tryk og hastighed i luftrøret blev målt på en udvalgt rørstrækning, således at der var mindst mulig måleusikkerhed.

Det kan samfattes

- at energiforbruget til en 4 m dykket mammutpumpe er meget højt
- at en del af den geometriske løftehøjde mistes lige ved udløbet fra mammutpumpen
- At en neddykket propelpumpe vil kunne præstere løftehøjden (men ikke beluftningen) med et energiforbrug på 25 % af det målte nuværende
- Propelpumpeløsningen vil kræve at vandet beluftes ved hjælp af en anden energieffektiv metode. Der er som eksempel regnet på en kummebeluftning som hos Abildvad. Resultatet af den teoretiske beregning viser, at der ved denne løsning kan spares ca. 4 % af det samlede årlige energiforbrug hos Kølkjær
- Ved erstatning af mammutpumper skal tages højde for investering i pumper og tilhørende backup løsning, så der sikres en tilfredsstillende grad af driftssikkerhed
- At kapselblæsernes effektivitet tillige er dårlig, dette afsløres af den store temperaturstigning der væsentligt overstiger det termodynamisk forventede.

Mammutpumpens effektivitet er meget lav og bruger i det aktuelle tilfælde 4,5 gange så meget energi som en veldimensioneret aksialpumpe ville bruge. Mammutpumpens iltningseffektivitet er energimæssigt i sammenligning overslagsmæssigt kun halvt så effektivt som det aktuelle oprindelige beluftningsprincip i Abildvad var. Her anvendtes et lige rør på tværs af bassinet overtrukket med en gummistrømpe.

Årsagen må vurderes at være de store bobler kombineret med den lave kontakt tid.

Ændringsmuligheder i Kølkær og generelt i dambrugsbranchen:

De nuværende højtrykskompressorers effektivitet var ikke god, hvilket ses af den store temperaturstigning, der var meget større end den aktuelle i Abildvad. Det er tilsyneladende lettere at effektivisere vandtransporten end beluftningen.

Hvis vandtransporten ændres til brug af propelpumper, vil det være nødvendigt at finde det mest effektive beluftningsprincip, da man nu ikke mere får beluftet sit vand ved hjælp af mammutpumpen.

### 13.1.4 Forsøg i laboratorium

Forsøgene viser at energiforbruget til beluftning afhænger markant af beluftningsprincippet og at det er værd at arbejde videre med.

Ved samme iltningseffektivitet havde det bedste arrangement et energiforbrug, der kun var på 68 % af den ”dårligste” afprøvede løsning.

- En lille luftstrøm giver en bedre beluftningseffektivitet i forhold til energiforbruget end en stor luftstrøm gennem samme armatur.
- Store huller (1,2 mm) giver lidt dårligere beluftningseffektivitet end små huller (0,5) mm
- En jævn fordeling af beluftningen over et større areal (ramme med huller) er bedre end beluftning med tilførsel af samme luftstrøm fra et lineært rør.
- Beluftning ved hjælp af et lineært rør overtrukket med en gummistrømpe er bedst af de gennemførte forsøg.
- Visuelt vurderet gav den snittede gummistrømpe de fineste bobler, hvilket med stor sandsynlighed er årsagen til den gode effektivitet.
- Opstigningshastigheden er ligger på ca. 0,33 - 0,4 m/s ved de aktuelle forsøg. Dvs. ved 0,8 m vanddybde er opstigningstiden = 2,4 sekunder.
- En stor luftstrøm koncentreret tilført øger opstigningen af den vandsøjle der indeholder luftboblerne og øger dermed opstigningshastigheden.

### 13.1.5 Samlet konklusion:

- Tilfør ikke mere luft end nødvendigt for at opretholde det ønskede iltindhold
- Kraftig lufttilførsel øger risikoen for spild af luft, grundet en stor opstigningshastighed og dermed en lille kontakttid, hvilket øger energiforbruget.

- Overbeluftning giver et unødvendigt ekstra energiforbrug, da luften bobler gennem vandet med store bobler, med relativt lille overfladeareal og reduceret kontakttid
- Det er ifølge teorien en fordel at lave meget små bobler, men selv ved anvendelse af små borede huller i plastrør huller (0,5 mm) dannes ikke så små bobler, at den ønskede langsomme opstigning for enkeltbobler.

### **Beluftningseffektivitet**

Det er relevant med en nøjere vurdering af det reelle luftbehov – særligt set i lyset af, at luftudnyttelsen i de beluftningsmetoder som er mål i dette projekt ligger ret lavt, 2-5 %. Dette gør det endvidere relevant at kigge nærmere på, hvordan denne udnyttelsesgrad kan gøres bedre

En mulig vej til reduktion af luftforbrug vil være en behovsstyring på baggrund af tilgængelig ilt i vandet samt andre driftsforhold som for eksempel fodringstider, sæsonudsving mm.

Der er mange forhold der spiller ind i forbindelse med effektiv opiltning af vand. De vigtigste parametre i forbindelse med processen er boblestørrelse og kontakttid. Mindre bobler og længere kontakt tid forøger effektiviteten. Ud fra de gennemførte forsøg kan teknologier og principper til effektiv beluftning af vand udvælges.

### **Behovstyring**

Behovet for beluftning i dambrug varierer over døgn og årstid samt i forbindelse med produktionen. Den optimale beluftning og iltning af vandet er delvis afhængig af valgt teknologi. For at opnå de bedste resultater er det vigtigt at styre beluftningsprocessen efter de aktuelle forhold.

Det er derfor relevant, at undersøge mulighederne for at lave en intelligent styring af beluftningen på dambrug under forudsætning af følgende:

- Robusthed
- Driftsikkerhed
- At lufttilførselen m<sup>3</sup>/h ved den enkelte dam + hovedluftflow kan aflæses af brugerne
- Så ved vi hvor energien bruges
- Så ved vi hvor der overbeluftes.
- At instrumentet har skruer, der viser hvad flowet plejer at være, evt. over sæson.
- Pris
- Minimalt vedligehold

## 14 Perspektivering

I det følgende er gjort nogle overvejelser om, hvor der er forhold, som bør undersøges nærmere. Undersøgelserne i indeværende projekt har klarlagt, at der er utroligt mange parametre i fiskeopdræt, som har indflydelse på hinanden og som til en vis grad modvirker hinanden. Eksempelvis kan en metode som er meget effektiv til iltning af vand skabe problemer med gasovermætning. Derfor kan man ikke nøjes med at anskue en parameter ad gangen.

### 14.1.1 Cirkulation af vand i dambruget:

Veldimensionerede dykkede propelpumper ser ud til at give det mindste energiforbrug når der er tale om store vandstrømme og små løftehøjder.

*Propelpumpen bør have en relativ lille gennemløbshastighed for ikke at miste hele det dynamiske tryk i udløbet. Det må anbefales at tale med fabrikanten om der kan findes særligt energibesparende propelventilatorer med udløbsstatorer og udløbstragte hvis formål er at genvinde en del af det udgående dynamiske tryk i vandstrålen.*

*Dette er gjort i det strømningsmæssigt helt analoge tilfælde aksialventilatorer for luft.*

### 14.1.2 Beluftning af vandet:

Forsøgene synes at vise at beluftning af vandet med synlige store bobler ikke er særlig effektiv, da luften bobler igennem vandet og har en passagetid gennem vandmassen på få sekunder.

Den nuværende beluftningsteknik (storbobleteknik) synes at begrænse hvor langt ned man kan nå med hensyn til energiforbrug til beluftning.

#### Måling af tilført luftstrøm.

Det anbefales at der bliver installeret direkte visende luftflowmetre, der viser hvor megen luft der tilføres til hver enkelt kumme(bassin). Det formodes at der overbeluftes i vidt omfang over vækstsæsonen, uden at det opdages. En indikator herfor er at der i to bassiner, hvor fiskene trives tilføres ret forskellige luftstrømme. Der bør være stilleskruer eller visere, hvorpå variationen over sæsonen markeres. Luftstrømmen sammenlignes nogle gange om året med en iltmåling. Også hovedluftstrømmen bør kunne måles.

#### Iagttagelser:

Mekanisk omrøring med en boremaskine og en malingsomrører fik iltprocenten til at stige fra 0 til 40 målt med iltmåleren, og iltkoncentrationen var forhøjet i 10 minutter derefter. Det virkede som om der var et lager af indpiskede mikroluftbobler i vandmassen.

#### bobleprincip 1

Det var interessant at undersøge om det er muligt indpiske et lager af mikro-luftbobler i et eventuelt neddykket skumkammer med lav vandudskiftning. Energien til den forbedrede opblanding hertil skulle komme fra blæsesystemet, f.eks. ved hjælp af en luftdreven roterende skive i et luftkammer. Rotationen skulle komme fra reaktionseffekten. Luftkammeret skulle være omgivet af et netbur hvis maskestørrelse skal hindre fisk i at blive ramt. Hvis luftkammeret har en ret høj luftandel vil friktionen blive nedsat og forbedre effekten. Der vil dog teoretisk være opstartsproblemer.

**bobleprincip 2**

Et anden forsøgsmulighed vil være at sinke opstigningen af luftboblerne ved hjælp af en zig-zagstruktur af svagt hældende plader over indblæsningszonen for storbobler. Boblernes passagetid skulle derved forsinkes. Forudsætningen er dog at boblerne ikke slår sammen til større bobler under opstigningen og ikke lægger sig som et fladt lag under skiverne. Det vil formentligt være nødvendigt at omgive strukturen med et net, der holder fiskene på afstand. Det skal undgås at fisk bliver hængende i strukturen under tømningen af karret.