

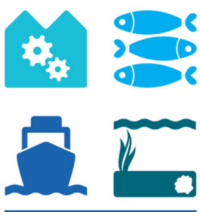
# End-of-Pipe rensning på dambrug



Faglig rapport fra Dansk Akvakultur nr. 2019-3

Afrapportering for projekt "End-of-Pipe rensning på dambrug" under Fælles initiativer inden for fiskeri- og akvakultursektoren

**HAV & FISK**



**Dansk Akvakultur**

The logo for Dansk Akvakultur features the text "Dansk Akvakultur" in a green, sans-serif font. Below the text is a stylized wave graphic with a green top and a blue bottom.

Den Europæiske Union  
Den Europæiske Hav- og Fiskerifond

## DATABLAD

Serietitel og nummer: Faglig rapport fra Dansk Akvakultur nr. 2019-3

Titel: End-of-Pipe rensning på dambrug

Undertitel: -

Forfattere: Per. B. Pedersen<sup>1</sup>, Anne J. T. Dalsgaard<sup>1</sup>, Mathis von Ahnen<sup>1</sup>, Kaare Michelsen<sup>2</sup>, Brian Thomsen<sup>2</sup>

Institutioner: <sup>1</sup>DTU Aqua, <sup>2</sup>Dansk Akvakultur

Udgiver: Akvakultur Forum

Finansiel støtte: Fødevareministeriet og EU

Projekt: Journal nr. 33111-I-16-045 og journal nr. 33111-I-16-046

Sammenfatning: Det er i projektet undersøgt, i hvilket omfang det er muligt at øge fjernelsen af kvælstof på dambrug, der er udbygget med biofilter. Der er fokus på at undersøge effekten af træflisfiltre, og der er gennemført en mindre vurdering af muligheder for brug af denitrifikation. Brug af træflisfiltre er testet i storskala forsøg på tre udvalgte dambrug. Projektets resultater omfatter både tekniske, praktiske og økonomiske parametre. I projektet konkluderes det, at brug af træflisfiltre fremstår som en effektiv, driftssikker og lønsom metode til fjernelse af kvælstof på dambrug, der er udstyret med biofilter.

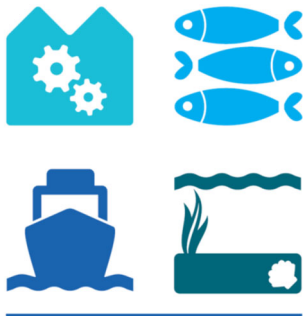
Emneord: Akvakultur, dambrug, træflis, denitrifikation, kvælstof, økonomi

Forsidefoto: Mølbak Dambrug (Foto: Mathis von Ahnen)

ISBN: 978-87-93397-09-5

Internetversion: [www.danskakvakultur.dk/images/projektrapporter](http://www.danskakvakultur.dk/images/projektrapporter)

## HAV & FISK



**Den Europæiske Union**  
**Den Europæiske Hav- og Fiskerifond**

## INDHOLD

<b>1. BAGGRUND OG FORMÅL</b> .....	<b>4</b>
<b>2. ORGANISERING</b> .....	<b>6</b>
<b>3. GENNEMFØRELSE</b> .....	<b>7</b>
<b>4. UDVÆLGELSE AF DAMBRUG</b> .....	<b>7</b>
<b>5. KVÆLSTOFFJERNELSE I DENITRIFIKATIONSFILTRE</b> .....	<b>8</b>
5.1 Introduktion .....	8
5.2 Metode .....	8
5.3 Resultater .....	10
5.4 Sammenfatning .....	11
<b>6. BRUG AF TRÆFLISFILTER TIL KVÆLSTOFFJERNELSE</b> .....	<b>12</b>
6.1. Introduktion .....	12
6.2. test til fastlæggelse af procesparametre .....	13
6.3. Storskala forsøg med træflisfiltere .....	15
<b>7. ERHVERSØKONOMISKE KONSEKVENSER</b> .....	<b>17</b>
7.1 Introduktion .....	17
7.2 Metode .....	17
7.3 Resultater .....	18
7.4 Sammenfatning .....	23
<b>8. PERSPEKTIVERING</b> .....	<b>24</b>
<b>9. BILAG</b> .....	<b>24</b>
9.1 Vejledning for brug af træflisfilter: DTU Aqua/DA .....	24
<b>REFERENCER</b> .....	<b>26</b>

## 1. BAGGRUND OG FORMÅL

Den danske strategi for bæredygtig udvikling af akvakultur 2014 - 20 har som vision, at produktionen af fisk på lang sigt skal ske i anlæg med recirkulering og rensning af vandet eller i offshoreanlæg i de åbne havområder.

I den politiske aftale om Fødevarer- og landbrugspakke fra december 2015 er det besluttet, at der skal udarbejdes en vækstplan for akvakultur, der understøtter vækst gennem strukturudvikling mod omlægning fra traditionelle dambrug til større og mere moderne, ressourceeffektive og miljøvenlige anlæg. I den politiske aftale ligger til grund, at sektorens vækst- og strukturudviklingsmuligheder især er begrænset af muligheden for udledning af kvælstof. Derfor er det et centralt element i vækstplanen, at der afsættes en supplerende kvælstofkvote til sektoren.

Aftaleparterne bag Fødevarer- og landbrugspakken er således enige om at tildele en supplerende kvælstofkvote på 200 ton kvælstof til dambrug, så dambrugserhvervet får mulighed for at udnytte deres nuværende udledningstilladelser. Samtidig tildeles yderligere 180 ton kvælstof til landbase-rede anlæg.

Parterne er videre enige om, at der kun tilføres mere kvælstof til anlæg, der som minimum har en ressourceeffektivitet på niveau med modeldambrug, og som er reguleret på emissioner.

I 2016 lancerede Regeringen, Dansk Folkeparti, Liberal Alliance og Det Konservative Folkeparti en vækstplan for akvakultur. Det følger bl.a. af planen, at der skal ske en revision af dambrugsbekendtgørelsen, og at der skal indføres supplerende kvælstof til dambrug.

Dambrugsbekendtgørelsen skal bl.a. justeres, så der fremover er to forskellige reguleringsspor for dambrug. Anlæg med en produktion svarende til anvendelse af max. 100 tons foder kan fremover miljøgodkendes efter en individuel BAT-vurdering, og store anlæg med en produktion svarende til anvendelse af over 100 tons foder skal overgå til emissionsbaseret regulering med de i bekendtgørelsen definerede BAT-niveauer på modeldambrugsniveau. Dette skal ske senest med udgangen af 2026. Det præciseres i aftalen, at anlæg af denne type vil kunne få adgang til ekstra kvælstof i medfør af Fødevarer- og landbrugspakken. Den nye reviderede dambrugsbekendtgørelse trådte i december 2016 (BEK nr. 1567 af 07/12/2016). Bekendtgørelsen indeholder en række tekniske tilretninger.

Vækstplanen bekræfter, at der skal indføres en supplerende kvælstofkvote på 380 ton til dambrugssektoren, i det der forventes, at dambrugserhvervet ved udgangen af 2021 kan have en samlet udledning på ca. 850 ton kvælstof. Kriterierne for tildeling af kvælstof skal sikre en udvikling mod mindre kvælstofudledning pr. produceret fisk, og de vil derfor prioritere ressourceeffektive anlæg på emissionsbaseret regulering.

I februar 2018 fremsatte miljø- og fødevareministeren lovforslag L 169 til ændring af lov om miljøbeskyttelse (Indfasning af kvælstof til akvakulturerhvervet), hvorefter miljø- og fødevareministeren bemyndiges til at fastsætte regler om kvælstofpuljer. Lovforslaget blev vedtaget i maj 2018, og bekendtgørelse om indfasning af kvælstof til akvakulturerhvervet blev indført i november 2018 (BEK nr. 1327 af 26/11/2018).

Der er på den baggrund behov for at optimere eksisterende renseteknologier og udvikle nye omkostningseffektive renseteknologier, der kan bidrage til, at dambrugserhvervets kvælstofkvoter udmøntes i den største mulige produktion af fisk.

En række dambrug er i dag ombygget til modeldambrug type I eller III. Flere af disse anlæg er indrettet med biofilter, som primært har til formål at omsætte den af fiskene udskilte ammonium til nitrat, hvorimod en egentlig fjernelse af kvælstof i afløbsvandet ikke finder sted i væsentligt omfang.

En række modeldambrug af især type 1 har problemer med at overholde krav til udledninger af kvælstof (nitrat og ammonium). Det skyldes bl.a., at de i forhold til type 3 anlæg opererer med relativt højere vandflow og relativt lavere organisk belastning. Disse forhold gør, at de ikke har nogen betydelig kvælstoffjernelse via heterotrof denitrifikation i plantelagunen. Det betyder, at de ikke kan udnytte produktionskapaciteten fuldt ud, hvilket reducerer miljøeffektiviteten og lønsomheden af investeringer i denne teknologi. Det er specielt kritisk, da der jf. ovenstående er et politisk ønske om, at dambrug ombygges til modeldambrug og overgår til emissionsbaseret regulering.

Undersøgelser foretaget af DTU Aqua har tidligere vist, at brug af træflis i særskilte filtre eller kanaler lavteknologisk kan øge fjernelsen af nitrat-kvælstof. Metoden vil kunne anvendes på både klassiske dambrug og modeldambrug type 1 med biofilter og på modeldambrug 3. Træflisfiltre vil kunne indgå som en del af de samlede renseforanstaltninger.

Der er behov for mere viden, før teknologien kan anvendes i storskala på dambrug. Der er endvidere behov for mere dokumentation for at kunne yde dambrugere og myndigheder en kvalificeret information og rådgivning om indretning og drift af filtre med træflis. Selv om metoden er meget lovende, er der mulige udfordringer, som skal belyses nærmere, herunder fx risiko for tilstopning.

Projektets primære formål er på den baggrund at styrke "end-of pipe" rensning (slutrensning) på såvel modeldambrug som andre dambrug med biofiltre installeret. Der er fokus på at tilvejebringe et fagligt grundlag for brug af træflis i særskilte filtre/kanaler med henblik på lavteknologisk og omkostningseffektivt at kunne fjerne nitrat-kvælstof fra alle slags dambrug med biofiltre.

Som led i projektet undersøges det endvidere, om det vil være muligt at udvikle en supplerende "end-of pipe" rensning, der kan øge kvælstoffjernelsen via denitrifikation på mere intensive anlæg med relativt lave vandflow og relativt høje belastninger af organisk stof. Det vil ske ved at teste et særskilt denitrifikationsfilter, som fødes med nitratholdigt vand fra det eksisterende biofilter og overløbsvand/rejectvand (kulstof/energikilde) fra slambehandlingsanlægget. Hypotesen er, at der i et sådant supplerende filter kan skabes de rette betingelser, dvs. iltfrit med nitratholdigt vand og let-omsætteligt organisk stof, hvorved en heterotrof denitrifikation fremmes. Fjernelsen af kvælstof vil primært være begrænset af tilgængeligheden af let-omsætteligt organisk stof.

Projektets resultater vil bidrage til at øge og stabilisere fjernelsen af især kvælstof. Perspektivet er, at alle eksisterende dambrug med biofiltre vil kunne øge produktionen (som minimum kvælstofneutralt), og at nye anlæg vil kunne indrettes og drives mere optimalt.

De vigtigste resultater er ny viden om brug af træflis til effektiv, lavteknologisk kvælstoffjernelse.

Resultaterne vil understøtte produktionsudvidelser på dambrug på emissionsbaseret regulering og miljøgodkendelse af dambrug på foderregulering.

## 2. ORGANISERING

Projektet er gennemført i perioden oktober 2016 til januar 2019 med et samlet budget på 2,75 mio. kr., hvortil der er ydet et tilskud på 100 %.

Projektet består af to ansøgninger i form af en hovedansøgning fra Dansk Akvakultur (journalnummer 33111-1-16-045) med et budget på ca. 1,1 mio. kr. og en delansøgning fra samarbejdspartneren DTU Aqua (journalnummer 33111-1-16-046) med et budget på ca. 1,65 mio. kr.

Projektet er endvidere gennemført i samarbejde med et antal udvalgte dambrug.

DTU Aqua havde det faglige ansvar for optimering af kvælstoffjernelse i denitrifikationsfiltre og test af træflis, herunder dataanalyse og konklusioner.

Dansk Akvakultur havde ansvaret for udvælgelse af dambrug, validering af de erhvervsøkonomiske resultater samt projektadministration, formidling og koordinering. Dansk Akvakultur bidrog endvidere med gennemførelse af de praktiske forsøg i samarbejde med de udvalgte dambrug.

Projektets primære målgruppe er eksisterende og nye dambrug, der er udstyret med biofilter. Resultaterne vil ydermere kunne udnyttes af bl.a. konsulenter, myndigheder og udstyrsleverandører.

### **3. GENNEMFØRELSE**

Projektet blev gennemført i henhold til tidsfristen, i det der ikke er søgt om forlængelse.

I august 2018 blev der gennemført en mindre budgetændring, hvor det samlede budget blev reduceret fra ca. 2,79 mio. kr. til ca. 2,75 mio. kr.

Det viste sig under projektforsøget, at arbejdet med træflis-løsningen præsenterede det største potentiale, men også, at der var behov for mere dybdegående undersøgelser og vurderinger. Derfor blev det besluttet at prioritere denne del, og at nedprioritere indsatserne omkring denitrifikation, der vurderes at rumme et væsentligt mindre potentiale.

Projektets resultater er løbende blevet præsenteret på temadage og medlemsmøder afholdt af Dansk Akvakultur.

### **4. UDVÆLGELSE AF DAMBRUG**

Der er udvalgt 3 modeldambrug til gennemførelse af fuldskala-forsøg. Alle anlæg er udstyret med biofilter, og de tre dambrug var alle indstillet på at gennemføre de nødvendige investeringer og anlægsindretninger samt at bistå med den praktiske gennemførelse af forsøgene.

Det vurderes, at de tre modeldambrug er repræsentative for "segmentet" som helhed. De dækker over forskellige indretninger og størrelser, og de tre cases vurderes derfor at være retningsgivende for de opnåede resultater.

Det bemærkes, at der er modeldambrug som ikke har ønsket at deltage grundet projektets karakter og omfang.

## 5. KVÆLSTOFFJERNELSE I DENITRIFIKATIONSFILTRE

### 5.1 INTRODUKTION

Kvælstof er det mindst tilbageholdte næringsstof på Modeldambrug og er i hensyn til den nye miljølovgivning hyppigst den begrænsende faktor for en yderligere udvidelse af akvakulturproduktionen i Danmark. Kvælstoffjernelse på dambrug foregår typisk i plantelaguner, men fjernelsen er dog ofte ikke tilstrækkelig effektiv, ligesom der for store anlæg vil være behov for endog meget store plantelaguner. Et sådant areal er typisk ikke tilgængeligt eller reelt anvendeligt, hvorfor der er behov for mere intensive og areal-effektive fjernelsesmetoder.

En sådan arealeffektiv kvælstoffjernelse kan opnås ved anvendelse af specifikke denitrifikationsfiltre, hvor et plastmedie (biofilterelement) anvendes som vedhæftningssted/begroningssted for denitrificerende bakterier under anaerobe (iltfrie) forhold. Under forbrug af organisk stof som energi/kulstofkilde fjerner bakterierne ilt fra nitrat ( $\text{NO}_3$ ), hvorved der dannes frit kvælstof ( $\text{N}_2$ ) som frit afgasser til atmosfæren. Processen er effektiv, og i et sådant mediebart filter kan der omsættes 100-185 g  $\text{NO}_3\text{-N}/\text{m}^3/\text{dag}$ . På et intensivt recirkuleret anlæg er processen typisk begrænset af tilgængeligheden af let-omsætteligt organisk stof, hvorfor man typisk tilsætter metanol eller ethanol som letomsættelig organisk kulstofkilde for at accelerere kvælstoffjernelsen.

Dette udgør imidlertid en omkostning, som typisk kan løbe op i en mér-udgift på +1 DKK pr. kg produceret fisk. Ved produktion af regnbueørred med en ab-farm pris på omkring 20 DKK/kg og en snæver avancemargin kan dette nemt være uøkonomisk.

I de senere år er der derfor blevet arbejdet med ideen om at udnytte fiskeopdrættets egen slam som mulig kilde til letomsætteligt organisk stof (Ref. 1 & 2).

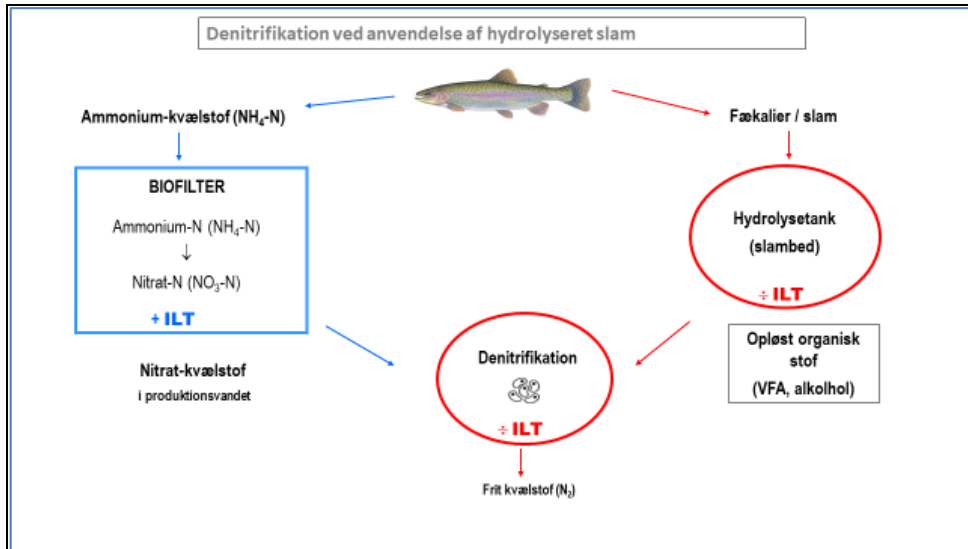
### 5.2 METODE

Fiskenes primære udskillelse af kvælstof (ca. 80%) er via gællerne som ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ). I et recirkuleret anlæg omdannes dette til nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) i et biofilter, hvorimod nitraten typisk ikke nedbrydes videre men derfor udledes til recipient eller slutrensningsforanstaltning (f.eks. plantelagune).

Den ufordøjelige del af foderet udskilles af fiskene via fækalier. Disse opsamles via f.eks. slamkegler og tromlefiltre (samt biofilterreturskyl) og føres til slamdepot for senere bortskaffelse.

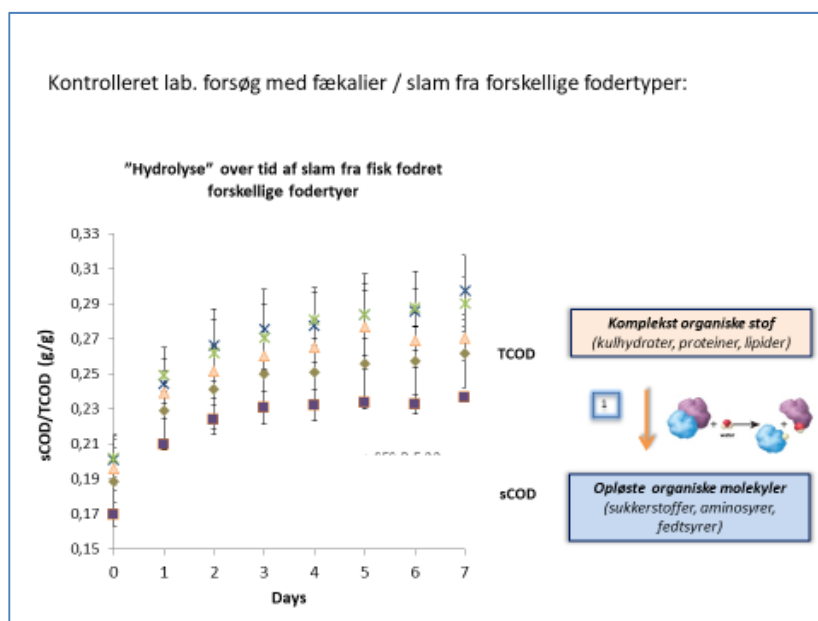


Fækaliene rummer betydelige mængder organisk stof, som via to mikrobielle processer - hydrolyse og fermentering – kan bringes på let-omsættelig, opløst form og derved indgå som kulstofkilde i føromtalte denitrifikation (Figur 1).



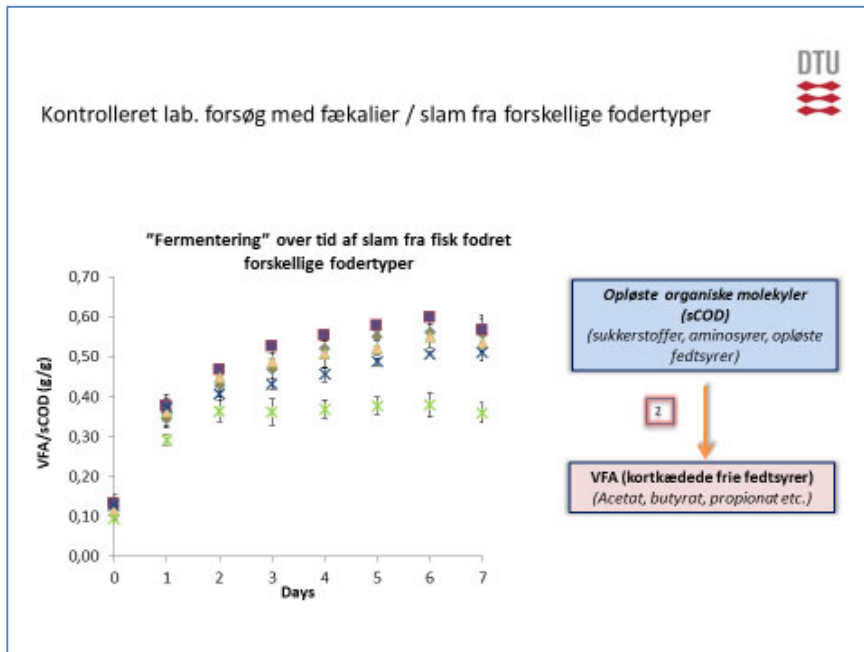
**Figur1.** Princippet i kvælstoffjernelse via fækalier/slam

Under kontrollerede forhold i en hydrolysetank nedbrydes det komplekse organiske stof i fækaliene (proteiner, kulhydrater, fedt) til kortkædede, opløste stoffer (aminosyrer, sukkerstoffer, fedtsyrer) i hydrolyse-processen. (Figur 2). Det optimale udbytte fås efter en opholdstid på 4-6 dage.



**Figur 2.** Hydrolyse af fækalier/slam (fra forskellige typer foder) over tid. Der ses en initial forøgelse af opløst COD (sCOD) ud af det totale COD (tCOD) indikerende hydrolyse.

Dernæst omdannes disse kortkædede stoffer til let-omsættelige, kortkædede fedtsyrer (VFA; volatile fatty acids) i en forgæring/fermenteringsproces (Figur 3). Disse VFA'er tilsættes derefter denitrifikationsreaktoren, idet de er særdeles velegnede som kulstofkilde til denitrifikationsprocessen.

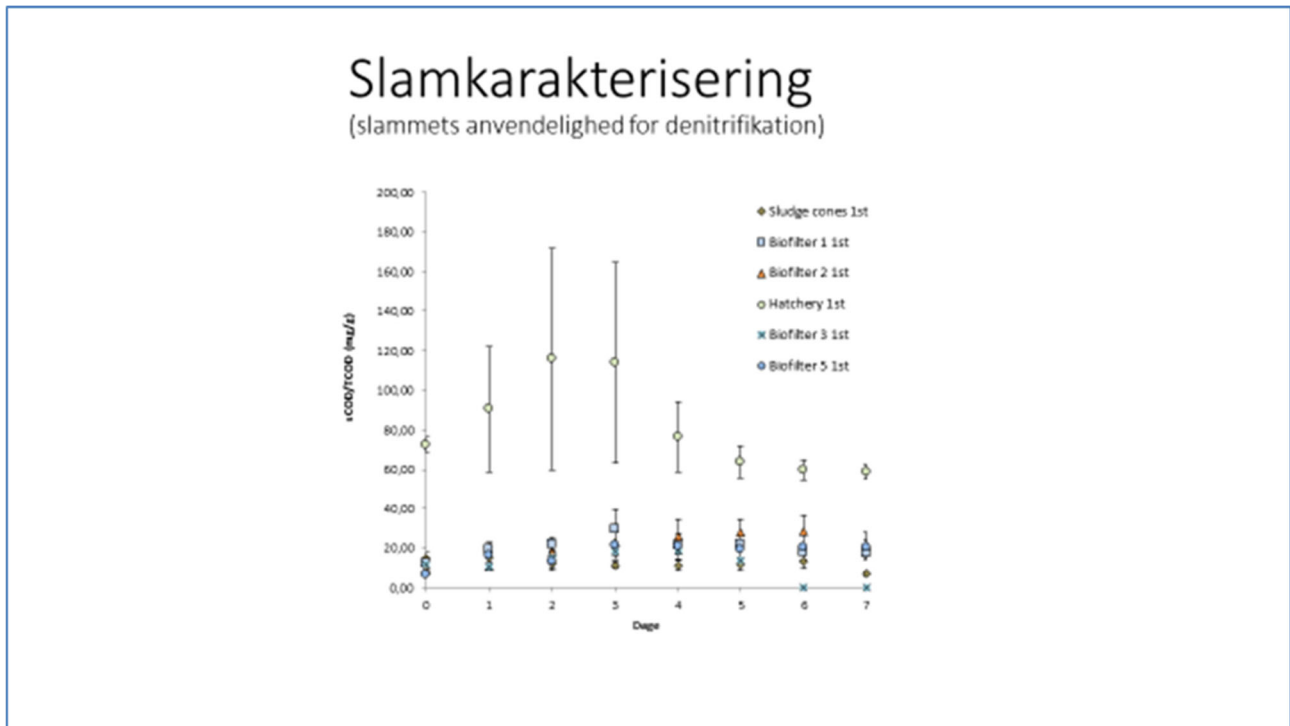


**Figur 3.** Fermentering af hydrolyseprodukter fra fækalier/slam (fra forskellige typer foder) over tid. Der ses en initial forøgelse af VFA ud af den totale mængde opløst COD (sCOD) indikerende fermentering.

### 5.3 RESULTATER

På et anlæg opstillet på et semi-recirkuleret dambrug blev forskellige slam-kilder indsamlet og undersøgt for potentiale til hydrolysering og dermed kulstofkilde for denitrifikation. Som figur 4 viser, var alene det friske slam indsamlet direkte fra kummehuset reelt anvendelig som kulstofkilde.

Det øvrige slam forekom "udbrændt" allerede inden det blev indsamlet, hvorfor det må konkluderes, at biofilterreturskyl ikke er egnet, og at slamkegleslam skal indsamles hyppigt og effektivt for at være den bedst mulige kilde.



**Figur 4.** Hydrolysekapacitet af forskellige slamkilder, udtrykt som opløst COD (sCOD) i forhold til det totale COD (tCOD). Det ses, at alene frisk slam fra kummehus er anvendeligt, hvorimod slammet for de øvrige kilder synes "udbrændte", inden indsamling kan foregå.

På det pågældende dambrug var slamkegle-slammet ikke velegnet, men det må formodes, at det vil det være på mere intensivt drevne type 3 Modeldambrug.

Den meget begrænsede reaktivitet på det pågældende dambrug gjorde, at fjernelsen af kvælstof via slam ville være begrænset (under 1 kg N/dag), og det blev derfor konkluderet, at metoden nok er anvendelig, men alene bør fokuseres på større, intensive anlæg. Her kan/vil en stor mængde frisk slam blive indsamlet hyppigt (løbende el. 1-2 gange/dag), nitratkoncentrationen er høj og mængderne vil bedre retfærdiggøre etablering og drift af udstyr. Anlæg af FREA-typen eller de mest moderne Modeldambrug type 3 (+) vil derfor kunne drage fordel af metoden, mens mindre intensive dambrug måske hellere bør fokusere på andre metoder til N-fjernelse.

## 5.4 SAMMENFATNING

Fiskenes fækalier/fiskeslam er velegnet som kulstofkilde til kvælstoffjernelse i denitrifikations-reaktorer med biofiltermedie efter 3-5 dages hydrolyse og fermentering. De herved dannede kortkædede, fede fedtsyrer (VFA-er) indgår effektivt som energi-/kulstofkilde i denitrifikationsprocessen.

Udnyttelse af dette potentiale kræver imidlertid en hurtig og effektiv indsamling af fækalierne og en kontrolleret proces i særskilt hydrolyseringstank med en opholdstid på 3-5 dage. Herefter tilføres det dannede VFA til denitrifikationsreaktoren.

Processen er hurtig og areal-effektiv (der kan omsættes 100-185 g  $\text{NO}_3\text{-N}/\text{m}^3/\text{dag}$ ), men kræver en vis styring og konstant tilførsel af letomsætteligt organisk stof. Metoden er derfor meget velegnet til intensive anlæg af FREA-typen eller de mest moderne Modeldambrug type 3 (+), hvor nitratkoncentration, den betydelige slammængde og driftskontrol muliggør procesoptimering.

VFA-dannelsen fra hydrolyse/fermenteringsprocessen kan løbende suppleres med metanol/ethanol eller anden kulstofkilde efter behov, således at denitrifikations-processen kontinuert kører under optimale betingelser og – fjernelsesrater. Mindre intensive dambrug bør formentlig hellere bør fokusere på andre, enklere metoder til N-fjernelse.

## 6. BRUG AF TRÆFLISFILTER TIL KVÆLSTOFFJERNELSE

### 6.1. INTRODUKTION

Kvælstof er det mindst tilbageholdte næringsstof på Modeldambrug og er i hensyn til den nye miljølovgivning hyppigst den begrænsende faktor for en yderligere udvidelse af akvakulturproduktionen i Danmark. Kvælstoffjernelse på dambrug foregår typisk i plantelaguner. Kvælstoffjernelsen i plantelaguner er dog typisk ikke tilstrækkelig effektivt, fordi organisk stof typisk ikke findes i store nok mængder/koncentrationer i afløbsvandet til at drive denitrifikationsprocessen.

Den begrænsede og ikke-specifikke kvælstoffjernelse i plantelaguner kan være en udfordring, da mange dambrugere har brug for at udvide deres produktion for at sikre, at deres RAS-systemer er økonomisk rentable. Der er derfor et presserende behov for praktiske og omkostningseffektive løsninger til at reducere kvælstofkoncentrationerne i afløbsvandet fra dambrug.

Nylige laboratorie- og pilotskalaundersøgelser har indikeret, at teknologisk enkle denitrifiserende træflisfiltre kan anvendes til at fjerne nitrat-kvælstof fra RAS-afløbsvand (Ref. 6 & 7). Træflisfiltre er typisk store, åbne kanaler fyldt med flis, hvor vandet passerer langsomt igennem. Træflisen fungerer som medie og substrat for bakterier, som i kombination med en lang hydraulisk retentionstid gør, at efter ilten hurtigt er opbrugt, fjernes derefter nitrat via denitrifikation.

## 6.2. TEST TIL FASTLÆGGELSE AF PROCESPARAMETRE

### 6.2.1 INTRODUKTION

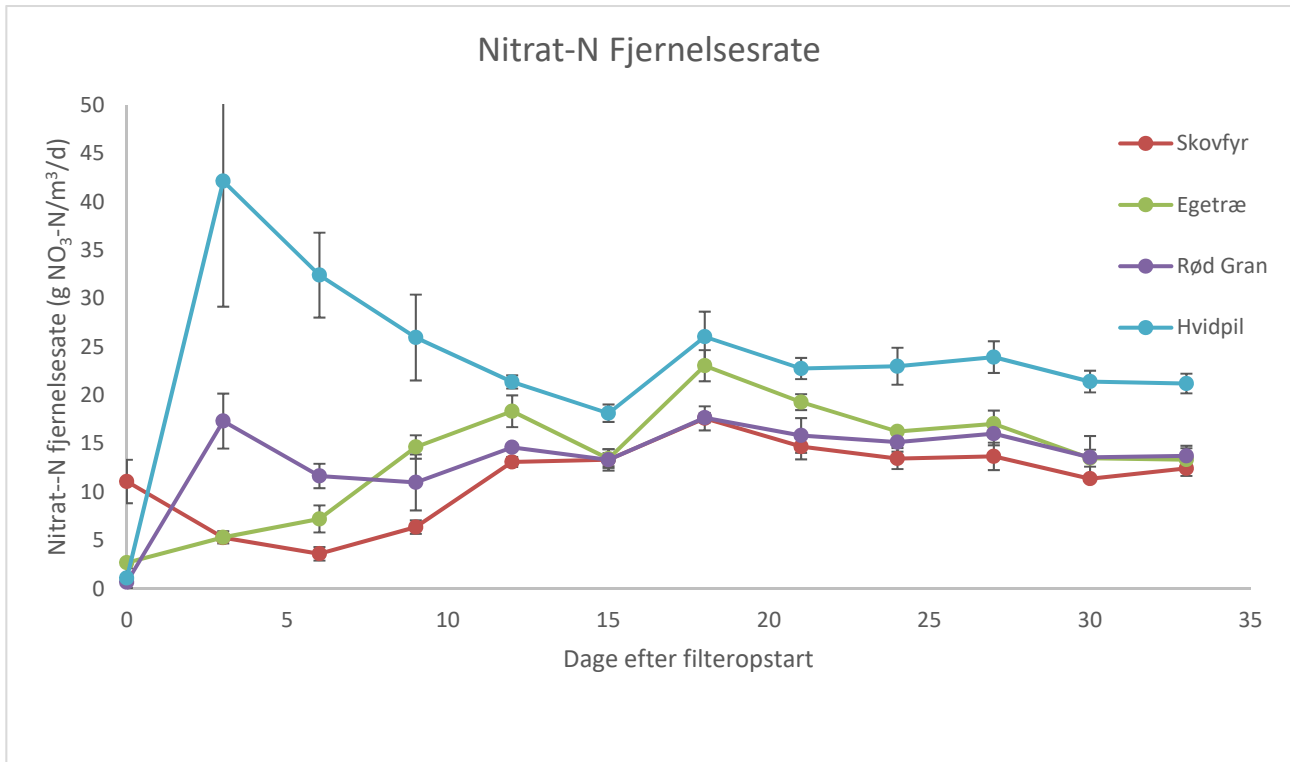
Træflisfiltrets princip er baseret på træflisens evne til at levere organisk stof til en denitrifikationsproces. Forskellige træarter kan potentielt indeholde organisk stof med forskellige bionedbrydelighed, og dermed kan den anvendte træflisart potentielt påvirke kvælstoffjernelsen i træflisfiltre. For at belyse spørgsmålet om hvilke sorter træflis, der optimalt kan anvendes i træflisfiltre, blev der foretaget en laboratorieundersøgelse med fire almindelige trætyper fundet i Danmark, både løvfældende og nåletræ-arter: Egetræ (*Quercus robur* L.), Rødgran (*Picea abies* L.), Skovfyr (*Pinus sylvestris* L.) og Hvidpil (*Salix alba*).

### 6.2.2 METODE

De fire typer flis var af samme størrelse og blev testet i tripliket i tolv cylindriske reaktorer, der alle kørte med en hydraulisk opholdstid på 12 timer. Reaktorerne blev tilført afløbsvand fra en pilot-skala ferskvands-RAS med opdræt af regnbueørred ved DTU Aquas forskningsfaciliteter i Hirtshals.

### 6.2.3 RESULTATER

I undersøgelsen viste pileflis den højeste gennemsnitlige nitratfjernelsesrate på  $21,4 \pm 8,3$  g  $\text{NO}_3\text{-N}/\text{m}^3/\text{d}$  efterfulgt af eg ( $12,4 \pm 5,6$  g  $\text{NO}_3\text{-N}/\text{m}^3/\text{d}$ ), rødgran ( $12,2 \pm 4,1$  g  $\text{NO}_3\text{-N}/\text{m}^3/\text{d}$ ) og slutteligt fyrretræ ( $10,2 \pm 4,1$  g  $\text{NO}_3\text{-N}/\text{m}^3/\text{d}$ ); Figur 5.



**Figur 5.** Nitrat-N fjernelsesrater i gNO<sub>3</sub>-N/m<sup>3</sup>/d for Skovfyr, Eg, Rødgran og Hvidpil i laboratorieundersøgelsen over de første 33 dage efter filteropstart.

De højere nitratfjernelsesrater i piletræer kan skyldes en potentielt højere bionedbrydelighed af det organiske stof, der findes i de hurtigt voksende piletræer i forhold til de andre testede arter. Varigheden af laboratorieundersøgelsen var ikke nok til at konkludere, om piletræer også under langtidsdrift ville fjerne nitrat mere effektivt end de andre tre træarter.

Piletræ synes dog at være en lovende kandidat til at levere fyldmateriale til træflisfiltre, da det er hurtigvoksende, prisbilligt og oftest let-tilgængeligt på grund af produktion til bioenergi. Potentielt kan pil dyrkes direkte på dambruget i tilknytning til plantelagunen.

#### 6.2.4 SAMMENFATNING

Laboratorieforsøget viste, at pileflis kan levere relativt høje nitratfjernelsesrater, og vil være let tilgængeligt. Det må dog antages, at piletræsflis potentielt skal udskiftes oftere i forhold til mere langsomt voksende træarter, der er mindre bionedbrydelige. Indtil videre anbefales det, at der bruges træarter til træflisfiltre, som er let-tilgængelige og økonomisk fordelagtige.

## 6.3. STORSKALA FORSØG MED TRÆFLISFILTRE

### 6.3.1 INTRODUKTION

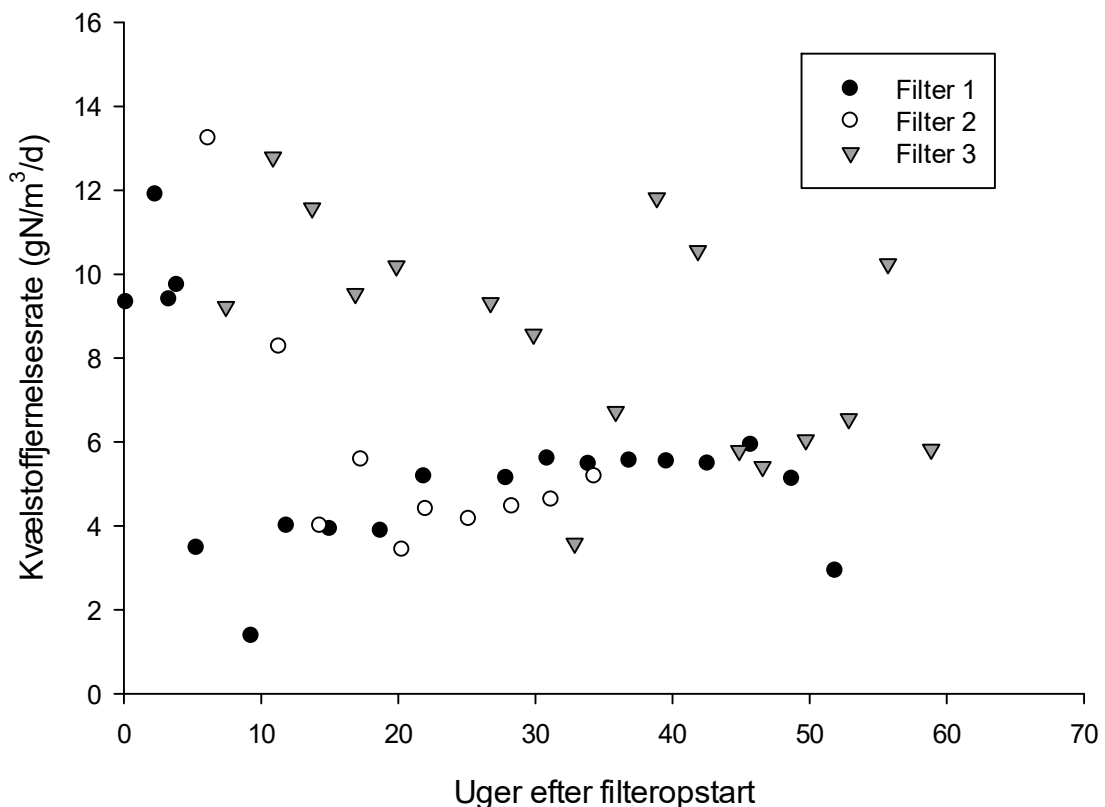
En tidligere, vellykket undersøgelse med et træflisfilter i pilotskala på 12,5m<sup>3</sup> pileflis, installeret på et mindre semi-recirkuleret dambrug, viste en gennemsnitlig kvælstoffjernelsesrate på 7,8 gN/m<sup>3</sup>/d ved en hydraulisk opholdstid på 5 timer og en gennemsnitstemperatur på 8 °C (Ref. 6). Filtret blev designet som et horisontal-flow filter, der imidlertid viste tegn på begyndende tilstopning efter et års drift. Baseret på disse tidligere resultater blev der lavet designberegninger og overvejelser for installation i fuld skala.

### 6.3.2 METODE

Tre træflisfiltre blev installeret i fuldskala på 3 forskellige ModelDambrug og der blev foretaget målinger på de tre filtre hver tredje uge gennem hele det første driftsår. Fjernelsesrater blev bestemt via målinger af vandflow og punktmålinger (grabsamples) fra indløbene og udløbene af de tre filtre.

### 6.3.3 RESULTATER

I løbet af 1 års overvågningsundersøgelsen opnåede de tre fuldskala træflisfiltre alle relativt stabile fjernelsesrater for total kvælstof på 5,3-8,5 g N/m<sup>3</sup>/d (4,5-7,8 g NO<sub>3</sub>-N/m<sup>3</sup>/d), hvorved det blev påvist, at sådanne lavteknologiske filtre kan være et effektivt alternativ eller supplement til fjernelse af nitrat fra afløbsvand fra recirkulerede akvakulturanlæg (Figur 6).



**Figur 6.** Kvælstoffjernelsesrater i gN/m<sup>3</sup>/d for tre træflisfiltre i fuld skala på 3 forskellige ModelDambrug i løbet af det første år efter filteropstart.

Udvaskning af opløst organisk stof fortsatte i op til et halvt år, mens der ikke sås nogen lignende udvaskning af opløst fosfor. En nettoproduktion af opløst organisk stof blev observeret under nitratbegrænsede betingelser i ét af filtrene, som var karakteriseret ved en relativt lav nitratbelastning på 5,5 g NO<sub>3</sub>-N/m<sup>3</sup>/d sammenlignet med ca. 16 g NO<sub>3</sub>-N/m<sup>3</sup>/d på de andre to filtre og en relativt lang opholdstid på 26 timer i forhold til 15-16 timer i de andre to filtre.

#### 6.3.4 SAMMENFATNING

Resultaterne fra et års monitoring bekræftede, at træflisfiltre kan etableres i fuld skala på dambrug for effektivt og prisbilligt at fjerne NO<sub>3</sub>-N fra afløbsvandet (Ref. 9 & 10). Træflisfiltre skal være designet til at minimere tryktab og risikoen for tilstopning, og i denne forbindelse synes reaktorer med vertikalt flow og med et stort indløbsområde at være et godt valg. Nitratbelastning og retentionsstid skal tilpasses, så de denitrificerende bakterier ikke bliver nitratbegrænsede.



## 7. ERHVERVSØKONOMISKE KONSEKVENSER

### 7.1 INTRODUKTION

For dambrug på emissionsbaseret regulering kan produktionen øges inden for dambrugets individuelt fastsatte miljømæssige ramme. I dette afsnit analyseres og vurderes de økonomiske konsekvenser ved brug af træflisfiltre, i det udgangspunkt er, at øget kvælstoffjernelse kan omsættes til øget produktion. Konkret ønskes der svar på, om investeringer i træflisfiltre vil være lønsomme.

### 7.2 METODE

Den anvendte undersøgelsesmetode er et kvalitativt casestudie baseret på analyseresultater fra de tre undersøgte dambrug.

For hvert dambrug undersøges det først, om koncentrationen af nitrat i træflisfilterets ind- og udløb er over de kritiske værdier på minimum hhv. 6 og 2 mg/l.

Dernæst vurderes det, hvor meget kvælstof der kan fjernes per dag og per m<sup>3</sup> træflisfilter. Det antages her, at der anvendes foder med 45 % protein, som bidrager med 38 kg opløst N per ton foder. Viser resultaterne fx, at der kan fjernes 1.500 kg kvælstof om året, så betyder det, at der på anlægget kan anvendes yderligere  $1.500/38 = 39$  ton foder. Det antages videre, at den gennemsnitlige foderkonvertering er på 0,95. I det anførte eksempel kan produktionen derfor øges med  $39/0,95 = 41$  ton fisk.

De produktionsmæssige og økonomiske konsekvenser analyseres under en alt andet lige forudsætning om, at produktionen kun afgrænses af udledningerne af kvælstof. Der tages således ikke højde for, at der kan være andre begrænsninger i form af fx udledninger af fosfor, organisk materiale, medicin og hjælpestoffer. Der er endvidere anlagt en marginalbetragtning, hvor det antages, at produktionen kan øges indenfor den eksisterende kapacitetsramme. Dette indebærer, at der ikke er indregnet eventuelle investeringer i supplerende kapacitet.

Analysen omfatter kun eksisterende anlæg, og der er ikke regnet på de økonomiske konsekvenser af at bruge træflisfiltre på nye anlæg, hvor filteret forlods vil kunne indtænkes i anlæggets indretning og drift. Det må dog ligges til grund, at der alt andet lige vil være yderligere fordele forbundet med at bruge træflisfiltre på nye anlæg.

For de enkelte dambrug skønnes tilbagebetalingstiden med Microsoft Excel (formel NPER). Den interne kalkulationsrente sættes til 7 %. De årlige omkostninger til drift og vedligehold af filteret sættes til 0 kr. Det generede dækningsbidrag for den marginale produktion, som skal finansiere investeringen, er beregnet ud fra nedenstående tabel, der viser det gennemsnitlige dækningsbidrag (G-DB) per kg for alle modeldambrug for perioden 2015 – 17 med afsæt i data fra regnskabsstatistik for akvakultur (kilde: Danmarks Statistik).

I tabellen er også vist det marginale dækningsbidrag (M-DB) ved produktion af 1 kg fisk. Det antages her, at alle driftsomkostninger på nær lønomkostninger er proportionale med produktionen. For lønninger sættes marginalbidraget til 50 %, fordi det – inden for visse rammer - er en fast omkostning. Under de anførte forudsætninger kan M-DB beregnes til 3,2 kr. per kg fisk.

	<b>G-DB</b>	<b>M-DB</b>
<b>Bruttoudbytte</b>	<b>21,6</b>	<b>21,6</b>
<b>Driftsomkostninger</b>	<b>19,5</b>	<b>18,4</b>
Foder/yngel/æg	12,3	12,3
Lønomkostninger	2,2	1,1
Andre variable	4,6	4,6
Nettorenteudgifter	0,4	0,4
<b>Dækningsbidrag</b>	<b>2,1</b>	<b>3,2</b>

Som supplement til beregning af tilbagebetalingsperioden estimeres det, hvilken effekt træflisfilteret vil have på anlægges lønsomhed, der her udtrykkes ved overskudsgraden (driftsresultat/bruttoudbytte). Driftsresultatet findes som dækningsbidrag minus afskrivninger.

For de enkelte dambrug beregnes det endvidere, hvad det vil koste at fjerne 1 kg kvælstof, i det filterets levetid sættes til 10 år, og udgifter til drift og vedligehold sættes til 0 kr.

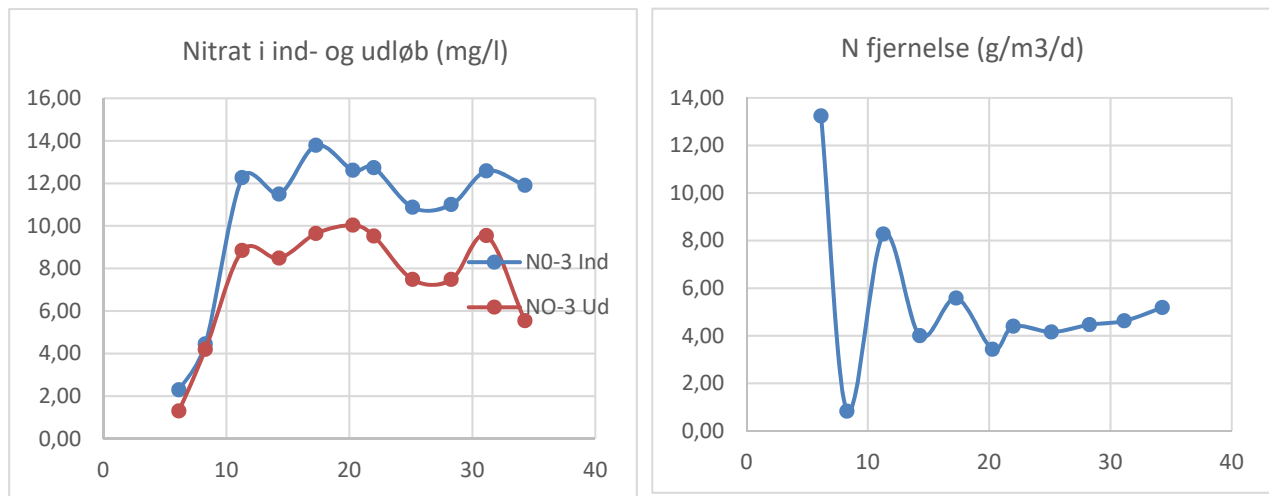
## 7.3 RESULTATER

### 7.3.1 ABILDVAD DAMBRUG

Data dækker 28 uger.

Figur 1 viser koncentrationen af nitrat i ind- og udløb fra træflisfilteret. Det ses, at koncentrationerne overholder de kritiske værdier på minimum hhv. 6 og 2 mg/l.

Figur 7 viser N fjernelsen over træflisfilteret i kg per dag i måleperioden. Det fremgår heraf, at der er steady-state ca. 15 uger efter opstart.



**Figur 7.** Nitrat i ind- og udløb samt N-fjernelse på Abildvad Dambrug

På basis af ovenstående kan den årlige N fjernelse anslås til ca. 5,3 g/m<sup>3</sup>/d svarende til ca. 2 kg per m<sup>3</sup>. Der er anvendt et træflisfilter på 650 m<sup>3</sup>. Der fjernes derfor ca. 1.257 kg kvælstof per år.

Den ekstra kvæstoffjernelse kan "omsættes" til en årlig øget produktion på ca.  $1.257 / (38 \times 0,95) = 35$  ton fisk. Det årlige marginale dækningsbidrag er dermed ca.  $35.000 \times 3,2 = 112.000$  kr.

Udgiften til at etablere træflisfilteret (entreprenør, spuns, flis, drænrør m.m.) er ca. 211.000 kr. svarende til ca. 325 kr. per m<sup>3</sup>

Tilbagebetalingstiden er beregnet til under 2 år, og det vil koste ca.  $21.100 / 1.257 = 17$  kr. at fjerne 1 kg kvælstof.

Dambruget har en  $F_{\text{fisk}}$  på ca. 52 ton foder. I henhold til dambrugsbekendtgørelsens bilag 2 kan det omregnes til en årlig maksimal kvælstofudledning på  $52 \times 56 \times 1,86 \times 0,5 = 2.708$  kg. Med en gennemsnitlig udledning på 20 kg kvælstof per ton foder kan den nuværende maksimale årlige produktion beregnes til  $2.708 / (20 \times 0,95) = 142$  ton fisk. Med træflisfilteret kan produktionen dermed alt andet lige øges til  $142 + 35 = 177$  ton svarende til ca. 25 %.

Konsekvensen er jf. nedenstående tabel, at overskudsgraden stiger fra 4,8 til 6,2%.

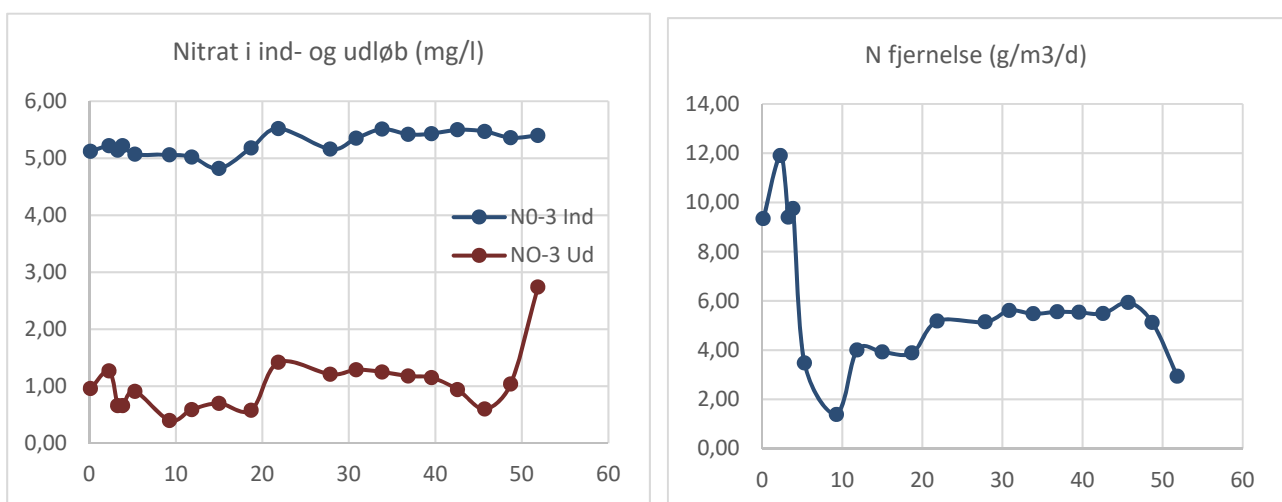
	Før	Efter
<b>Produktion</b>	<b>142</b>	<b>177</b>
<b>Bruttoudbytte</b>	<b>3.073</b>	<b>3.830</b>
<b>Driftsomkostninger</b>	<b>2.926</b>	<b>3.591</b>
Foder/ungel/æg	1.749	2.180
Lønomsomkostninger	317	356
Andre variable	655	816
Afskrivninger	155	155
Træflisfilter	0	21
Nettorenteudgifter	51	63
<b>Driftsresultat</b>	<b>147</b>	<b>239</b>
<b>Overskudsgrad</b>	<b>4,8%</b>	<b>6,2%</b>

### 7.3.2 LUNDBY DAMBRUG

Data dækker ca. 52 uger.

Figur 8 viser koncentrationen af nitrat i ind- og udløb fra træflisfilteret. Det ses, at koncentrationerne ikke fuldt ud overholder de kritiske værdier på minimum hhv. 6 og 2 mg/l.

Som det fremgår af figuren, opnås der steady-state efter ca. 20 uger.



Figur 8. Nitrat i ind- og udløb samt N-fjernelse på Lundby Dambrug

På basis af ovenstående kan den årlige N fjernelse anslås til ca.  $5,7 \text{ g/m}^3/\text{d}$  svarende til ca. 2,1 kg per  $\text{m}^3$ . Der er anvendt et "dykket" træflisfilter på ca.  $250 \text{ m}^3$ . Der fjernes derfor ca. 520 kg kvælstof per år.

Den ekstra kvælstoffjernelse kan "omsættes" til en årlig øget produktion på ca.  $520/(38 \times 0,95) = 14$  ton fisk. Det årlige marginale dækningsbidrag er dermed ca.  $14.000 \times 3,2 = 44.800$  kr.

Udgiften til at etablere træflisfilteret (entreprenør, spuns, flis, drænrør m.m.) er ca. 72.000 kr. svarende til ca. 240 kr. per  $\text{m}^3$

Tilbagebetalingstiden er beregnet til knap 2 år, og det vil koste ca.  $7.200/520 = 14$  kr. at fjerne 1 kg kvælstof.

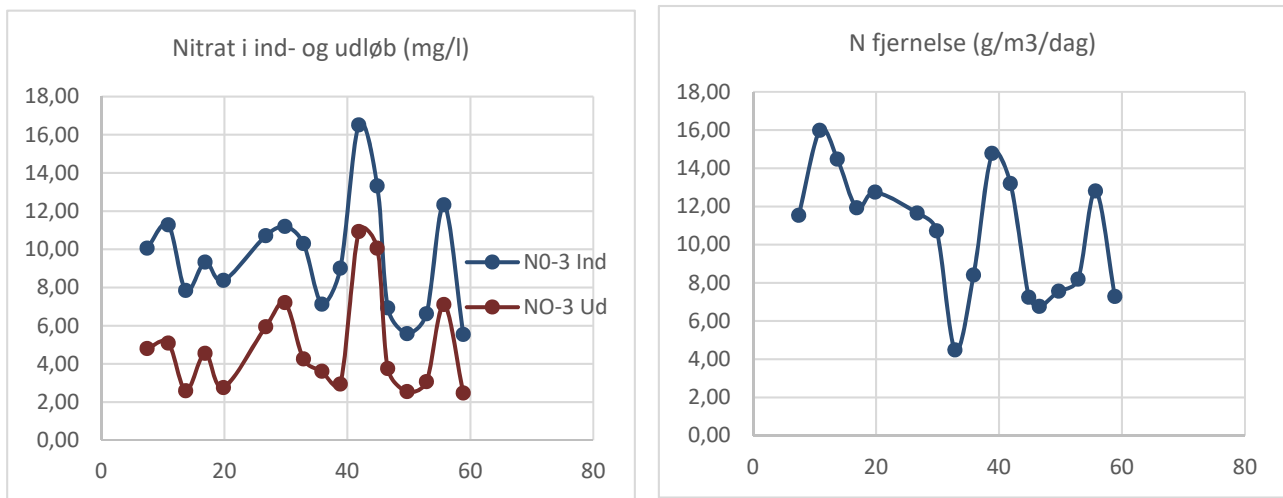
Dambruget har en  $F_{\text{till}}$  på 18 ton. Den årlige maksimal kvælstofudledning er derfor ca.  $18 \times 56 \times 1,86 \times 0,5 = 937$  kg. Med en gennemsnitlig udledning på 20 kg kvælstof per ton foder kan den nuværende maksimale årlige produktion beregnes til  $937/(20 \times 0,95) = 49$  ton fisk. Med træflisfilteret kan produktionen dermed alt andet lige øges til  $49 + 14 = 63$  ton svarende til ca. 29 %.

Med samme metode som ovenfor stiger overskudsgraden stiger fra 4,8 til 6,5%.

### 7.3.3 MØLBAK DAMBRUG

Data for Mølbak Dambrug dækker ca. 60 uger.

Figur 9 viser koncentrationen af nitrat i ind- og udløb fra træflisfilteret. Det ses, at koncentrationerne overholder de kritiske værdier på minimum hhv. 6 og 2 mg/l.



**Figur 9.** Nitrat i ind- og udløb samt N-fjernelse på Mølbak Dambrug

På basis af ovenstående kan den årlige N fjernelse anslås til ca.  $8,5 \text{ g/m}^3/\text{d}$  svarende til ca.  $3,1 \text{ kg N}$  per  $\text{m}^3$ . Der er anvendt et træflisfilter på ca.  $1.250 \text{ m}^3$ . Der fjernes derfor ca.  $3.878 \text{ kg}$  kvælstof per år.

Den ekstra kvælstoffjernelse kan "omsættes" til en årlig øget produktion på ca.  $3.878 / (38 \times 0,95) = 107 \text{ ton}$  fisk. Det årlige marginale dækningsbidrag er dermed ca.  $107.000 \times 3,2 = 342.400 \text{ kr.}$

Udgiften til at etablere træflisfilteret (entreprenør, spuns, flis, drænrør m.m.) er ca.  $524.000 \text{ kr.}$  svarende til ca.  $419 \text{ kr.}$  per  $\text{m}^3$

Tilbagebetalingstiden vil være mindre end 1 år, og det vil koste ca.  $52.400 / 3.878 = 13 \text{ kr.}$  at fjerne  $1 \text{ kg}$  kvælstof.

Dambruget har en  $F_{\text{till}}$  på  $198 \text{ ton}$ . Den årlige maksimal kvælstofudledning er derfor ca.  $198 \times 56 \times 1,86 \times 0,5 = 10.312 \text{ kg}$ . Med en gennemsnitlig udledning på  $20 \text{ kg}$  kvælstof per ton foder kan den nuværende maksimale årlige produktion beregnes til  $10.312 / (20 \times 0,95) = 543 \text{ ton}$  fisk. Med træflisfilteret kan produktionen dermed alt andet lige øges til  $543 + 107 = 650 \text{ ton}$  svarende til ca.  $20 \%$ .

Med samme metode som ovenfor stiger overskudsgraden stiger fra  $4,8$  til  $6,1\%$ .

## 7.4 SAMMENFATNING

På basis af ovenstående resultater, som er rimeligt konsistente over de tre anlæg, kan det konkluderes, at der med et træflisfilter årligt kan fjernes 2 til 3 kg. kvælstof per m<sup>3</sup>.

Der er ikke uventet store variationer i udgifter til etablering af træflisfilter, i det de varierer fra 240 til 420 kr. per m<sup>3</sup>. Det skyldes, at udgiften i høj grad afhænger af de lokale forhold. Det har således stor betydning, i hvor høj grad der vil være behov for at anvende en entreprenør til at forestå gravearbejdet. Der kan ligeledes være store forskelle i udgifter til materialer som fx drænrør, spuns, plader m.v.

Udgiften til at fjerne kvælstof er opgjort til mellem 13 og 17 kr. per kg. I alle tre tilfælde er der tale om meget korte tilbagebetalingstider, og det må konkluderes, at etablering af et træflisfilter i udgangspunktet vil være en lønsom investering. Der må dog tages højde for, at der i praksis vil være andre begrænsende parametre i forhold til fx udledninger af fosfor, organisk materiale samt hjælpestoffer og medicin. Ved større udvidelser kan det derfor ikke antages, at kvælstof er den eneste begrænsende parameter.

Resultaterne viser endvidere, at den marginale produktionsforøgelse bidrager til et væsentligt løft i overskudsgraden, der i alle tilfælde hæves væsentligt

Der er ikke under projektførelsen konstateret væsentlige problemer med driften af træflisfilteret.

Resultaterne tyder på, at et træflisfilter kan bidrage til at stabilisere og minimere variansen på udledningerne, men at den fulde effekt først kan forventes efter mindst 1 års drift. Dette kan have en positiv effekt på de statistiske beregninger, som ligger til grund for emissionsbaseret regulering.

I de tre cases er der fokuseret på den økonomiske effekt, som følge af øget kvælstoffjernelse, men et træflisfilter kan være en relevant og omkostningseffektiv løsning for de dambrug, der måtte have problemer med at overholde andre udlederkrav, herunder fx BAT-standardkrav.

Samlet set kan det konkluderes, at træflisfilter som rensningsteknologi kan bidrage til at eliminere udledning af kvælstof som en begrænsende produktionsparameter på de dambrug, hvor løsningen kan anvendes i praksis, og hvor driftsforholdene og dambrugets indretning i øvrigt tillader det. De økonomiske beregninger viser, at investeringen vil være lønsom, og at den kan bidrage til en væsentlige styrkelse af rentabiliteten udtrykt ved overskudsgraden.

## 8. PERSPEKTIVERING

Det vurderes, at resultaterne fra forsøg med træflisfiltre vil have vidtrækkende positive konsekvenser for udvikling i landbaseret opdræt. Teknologien er driftssikker og omkostningseffektiv. Beregninger viser, at teknologien kan lede til øget produktion via en bedre udnyttelse af tilladelser til at udlede kvælstof. Der vil endda meget korte tilbagebetalingstider, og træflisfiltre kan bidrage til at styrke rentabiliteten.

Det understøttes af, at flere dambrug allerede har investeret i teknologien.

Der vil være relevant at undersøge, i hvilket omfang det vil være muligt at optimere teknologien via fx forbedret drift, anlægsindretning, og brug af andre træsorter. Det bør ligeledes undersøges, om træflisfiltre kan udvikles til også at reducere andre udledninger, som fx fosfor, organisk materiale samt hjælpestoffer og medicin.

Det vil ligeledes være relevant at undersøge om brug af træflisfiltre kan anvendes som virkemiddel til generelt at reducere udledninger af kvælstof til kystvande jf. de reduktionskrav der er opstillet til sikring af god økologisk i henhold til vandrammedirektivet.

## 9. BILAG

### 9.1 VEJLEDNING FOR BRUG AF TRÆFLISFILTER: DTU AQUA/DA

- Træflisfiltre fjerner omkring 8-10 g NO<sub>3</sub>-N/m<sup>3</sup>/d v. 10-12° C
- Det kan generelt forventes, at fjernelsesraten fordobles ved en temperaturstigning på 10 grader (alle andre parametre uændrede)
- Input af partikler og organisk stof til træflisfiltret bør generelt minimeres for at reducere risikoen for tilstopning
- For at reducere tryktabet og risikoen for tilstopning anbefales det, at flisfiltre etableres med f.eks. med vertikalt flow
- Vertikalt flow filtre anbefales opbygget som down-flow filtre, hvor vandet trækkes ud af bunden af filtret ved brug af f.eks. ø160mm drænslinger, der lægges med 1-1,5 m afstand til hinanden i bunden af filtret. Drænslingerne skal fastmonteres i bunden af filtret ved hjælp



- af bøjler, sandposer eller lignende for at undgå at drænsangerne løftes op grundet gasudviklingen ( $N_2$ ) i filtret
- På udløbssiden føres drænsangerne igennem en spunset væg/jordvold, hvor der i hver slange monteres et rør med bøjning i højde svarende til vandoverfladen, hvorved mængden af vand der trækkes fra det enkelte drænrør kan reguleres
  - Vandet skal fordeles ligeligt i filtret og "short-cutting" af vand skal undgås
  - For at reducere tryktabet og mindske risikoen for tilstopning anbefales at en forholdsvis stor størrelse træflis vælges (mindst 7 til 15 cm i længden, gerne større). Formen af flisene bør være uregelmæssig frem for firkantede og flade stykker, der kan reducere mellemrummene for vandets flow
  - Der kan vælges den mest økonomiske og bæredygtigste træflis
  - Opholdstiden i filtret skal gerne være minimum 10 timer (beregnet på hele volumen i filtret uden flis) for at sikre at iltfrie forhold også om vinteren, når de mikrobiologiske processer løber langsommere
  - Der findes en lineær sammenhang mellem opholdstiden i flisfiltret og kvælstoffjernelsen, dvs. jo længere opholdstid, desto lavere bliver kvælstofkoncentrationen i afløbsvandet
  - Opholdstiden tilpasses, således at udløbskoncentrationen er mindst 2 mg  $NO_3-N/l$  for at undgå at denitrifikationsprocessen i flisfiltret bliver nitrat-begrænset. Hvis filtret, eller dele af filtret, er nitratbegrænset vil udløbet af filtret lugte af svovlbrinte o. a.
  - Input af ilt til træflisfiltret bør minimeres for at øge denitrifikationsraten og for at øge levetiden af flisen i indløbsområdet
  - Hvis der er høj/rigelige koncentration af nitrat i afløbsvandet kan det overvejes at træflisfiltret f.eks. behandler en delstrøm af afløbsvandet med øget opholdstid for derved at reducere input af ilt og organiske partikler til flisfiltret
  - Hvis muligheden eksisterer, anbefales flisfiltret etableret midtvejs i en plantelagune. Den første del af plantelagunen hjælper med til at reducere mængderne af partikler og ilt (og der sker en vis kvælstoffjernelse), hvorimod den sidste del af plantelagunen fjerner det organiske stof som i de første uger efter opstart kan udvaskes fra filtret
  - Hvis flisfiltret virker korrekt, bør der være omkring 1 mg  $O_2/l$  eller mindre i afløbet derfra. Udløbet bør derfor beluftes inden endeligt afløb til recipient
  - Spunsvæg eller lignende kan anvendes, men det kan anbefales at der bruges f.eks. jordvolde til at inddæmme flisfiltret

## REFERENCER

1. Towards environmentally sustainable aquaculture: Exploiting fermentation products from anaerobic sludge digestion for fueling nitrate removal in RAS; Suhr, K. I. & Pedersen, P. B., 2011, *Workshop on Recirculating Aquaculture Systems Helsinki, October 5-6, 2011*. Dalsgaard, A. J. T. (ed.). Charlottenlund: DTU Aqua. Institut for Akvatiske Ressourcer, Vol. No. 36. 52 p. (DTU Aqua Report; No. 237-2011).
2. Controlling effluents from RAS – waste management strategies important for commercial RAS sustainability; Pedersen, P. B., Suhr, K. I. & Pedersen, L-F., 2011, Aquaculture America, New Orleans, USA. *Book of Abstracts*.
3. End-of-pipe denitrification using RAS effluent waste streams: Effect of C/N-ratio and hydraulic retention time; Suhr, K. I., Pedersen, P. B. & Arvin, E., 2013, *Aquacultural Engineering*. 53, SI, p. 57-64
4. End-of-pipe single-sludge denitrification in pilot-scale recirculating aquaculture systems; Suhr, K. I., Pedersen, L-F. & Nielsen, J. L., 2014, *Aquacultural Engineering*. 62, p. 28-35
5. Transforming waste into new resources: optimizing sludge hydrolysis to improve nitrogen removal in aquaculture through denitrification; Letelier-Gordo, C. O., Pedersen, P. B. & Dalsgaard, A. J. T., 2017, Technical University of Denmark. National Institute of Aquatic Resources. PhD-thesis, 119 p.
6. Start-up performance of a woodchip bioreactor operated end-of-pipe at a commercial fish farm—A case study; von Ahnen, M., Pedersen, P. B. & Dalsgaard, A. J. T., 2016, In : *Aquacultural Engineering*. 74, p. 96-104; Research output: Contribution to journal › Journal article – Annual report year: 2016 › Research › peer-review
7. Optimizing nitrate removal in woodchip beds treating aquaculture effluents; von Ahnen, M., Pedersen, P. B., Hoffmann, C. C. & Dalsgaard, A. J. T., 2016, In : *Aquaculture*. 458, p. 47-54; Research output: Contribution to journal › Journal article – Annual report year: 2016 › Research › peer-review
8. Nitrate removal from aquaculture effluents using woodchip bioreactors improved by adding sulfur granules and crushed seashells; von Ahnen, M., Pedersen, P. B. & Dalsgaard, J., 2018, In : *Water Science and Technology*. 77, 9, p. 2301-2310; Research output: Contribution to journal › Journal article – Annual report year: 2018 › Research › peer-review
9. Performance of full-scale woodchip bioreactors treating effluents from commercial RAS; von Ahnen, M., Pedersen, P. B. & Dalsgaard, J., 2018, In : *Aquacultural Engineering*. 83, p. 130-137; Research output: Contribution to journal › Journal article – Annual report year: 2018 › Research › peer-review
10. <https://www.youtube.com/watch?v=YYyNIXb5aI0>