

# Omsætning af ammonium-kvælstof i biofiltre på Modeldambrug



Karin Isabel Suhr, DTU Aqua  
Per Bovbjerg Pedersen, DTU Aqua  
Lars M. Svendsen, Danmarks Miljøundersøgelser, Århus Universitet  
Kaare Michelsen, Dansk Akvakultur  
Lisbeth Jess Plesner, Dansk Akvakultur

**Projekt finansieret af EU's fiskerisektorprogram FIUF og Fødevareministeriet.**

**DTU Aqua**  
Nordsøen Forskerpark  
9850 Hirtshals  
Juli 2008

ISBN: 978-87-7481-083-4

DTU Aqua-rapport nr.: 194-08

## FORORD

Dette projekt blev gennemført i perioden august 2007 – april 2008 på Kongeåens Dambrug. Foruden Kongeåens Dambrug, deltog Dansk Akvakultur, DTU-Aqua og Danmarks Miljøundersøgelser, Århus Universitet, i arbejdet. Projektet har fokus på kvælstofomsætningens første trin, nitrifikationen, på Modeldambrug, og udspringer således af de fremadrettede fokuspunkter, som det 2-årige Modeldambrugsprojekt har klarlagt for recirkulerede fiskeopdrætsanlæg i Danmark.

Projektet blev finansieret af Den Europæiske Unions Fiskerisektorprogram FIUF og Fødevareministeriet, samt interne midler fra DTU-Aqua. Der takkes hermed for den tildelte bevilling.

Vi ønsker at takke ejere og personale på Kongeåens Dambrug, hvis hjælp har været en forudsætning for at kunne gennemføre projektet. Ligeledes har teknikere fra DMU, Uffe Mensberg, Henrik Stenholt og Carsten Nielsen, og DTU-Aqua, Ulla Sproegel, Dorthe Frandsen, Ole Madvig og Jesper Knudsen været uundværlige for projektet. Sidst men ikke mindst, en stor tak til Bjarne og Torben fra Billund Akvakultur for stor hjælpsomhed.

Hirtshals, d. 4. juli 2008

## 0. Resumé

Projektet har undersøgt mulighederne for at tilvejebringe en øget ammonium-omsætning (nitrifikation) på Modeldambrug, da den fremtidige ørred-produktion reelt vil blive begrænset af udledningen af kvælstof. Projektet blev gennemført som et praktisk studie på Kongeåens Dambrug, hvor fire biofiltre med to forskellige filtertyper (moving bed og fastmedie filtre) blev etableret til efterbehandling af vand fra produktionsenhedens udløb. Filtermediet i fastmediefiltrene var Bioblok 200 og filtermediet i moving bed filtrene var af typen Biomedia 850.

Der var god reproducerbarhed mellem filtrene af samme type gennem hele projektperioden efter opstartsfasen, og pilotfiltrene udviste stabile renseevner, som var substrat-, alkalinitets- eller iltbegrænset, alt efter forholdene.

Omsætningskapaciteten i pilotfiltrene var væsentligt højere end i dambrugets interne biofilter. Således målt ammoniumomsætninger på  $0,4 \text{ g N/m}^2/\text{døgn}$  for fastmedie filtre og  $0,2 \text{ g N/m}^2/\text{døgn}$  for moving bed filtre (ved indløbskoncentration på  $4,1 \pm 0,6 \text{ mg NH}_4\text{-N/l}$ ,  $8^\circ \text{ C}$  og ca.  $10 \text{ mg O}_2/\text{l}$ ).

I driftsforsøg med ammoniumtilsætning øgedes omsætningskapaciteterne efter tilvænnning til højt ammonium niveau ( $6,3 \pm 0,4 \text{ mg NH}_4\text{-N/l}$ ) til  $0,7 \text{ g N/m}^2/\text{døgn}$  og  $0,3 \text{ g N/m}^2/\text{døgn}$  for henholdsvis fastmedie filtre og moving bed ( $8^\circ \text{ C}$  og iltniveau over  $8 \text{ mg/l}$ ). Dambrugets interne biofilters kapacitet lå omkring  $0,1 \text{ g N/m}^2/\text{døgn}$ . Det er således vist, at ammonium-omsætning kan forøges betydeligt gennem optimeret design og drift af biofiltere.

Ved forsøg på fastmediefilter blev det vist at omsætningshastigheden af ammonium var kraftigt faldende ved en iltmætningsprocent under ca. 60 % ( $7 \text{ mg O}_2/\text{l}$  ved  $8^\circ \text{ C}$ ) ved filterudløb.

Fastmediefiltrene udviste den højeste overfladespecifikke omsætning, mens omsætningen pr. filter (ikke overfladekorrigeret) var meget ens de to filtertyper imellem. Der observeredes en tendens til, at fastmediefiltrene var mere fleksible m.h.t. tilvænnning af omsætningshastighed til højere ammoniumkoncentrationer. Således målt en filterspecifik omsætning på totalt  $463 \pm 34$  og  $389 \pm 9 \text{ g/døgn}$  for henholdsvis moving bed og fastmedie filtre i en forsøgsrække med varierende opholdstid og indløbskoncentration op til forsøget på  $3 \text{ mg NH}_4\text{-N/l}$ , hvorimod en indløbskoncentration på  $6 \text{ mg NH}_4\text{-N/l}$  i tilsvarende serie gav  $439 \pm 20$  og  $645 \pm 76 \text{ g/døgn}$  for henholdsvis moving bed og fastmedie filtre.

Resultaterne fra dette projekt peger på, at efterrensning er en praktisk mulig løsning til nedbringelse af ammoniumindholdet i udløbsvandet for dambrug, som måtte have vedvarende problemer med højt ammoniumindhold.

## Indhold:

<b>0. Resumé .....</b>	<b>1</b>
<b>1. Indledning .....</b>	<b>3</b>
Kvælstofomsætning.....	4
Nitrifikation .....	4
Ammonifikation .....	5
Denitrifikation .....	5
<b>2. Projektets baggrund og formål .....</b>	<b>7</b>
<b>3. Beskrivelse af anlæg samt målemetoder .....</b>	<b>8</b>
Kort beskrivelse af Kongeåens Dambrug.....	8
Projektets pilot-filtre på Kongeåens Dambrug .....	9
Prøveudtagning .....	11
Kemiske analyser .....	12
<b>4. Forsøgsoversigt .....</b>	<b>13</b>
<b>5. Målinger fra opstart af filtrene og til etableret stabil drift. 13</b>	
Opstartsperiode (november 2007 – januar 2008).....	14
Driftsforsøg - Efterrensning (januar 2008 – marts 2008) .....	17
"Driftsmåliger" med tilsætning af ammonium.....	21
<b>6. Undersøgelse af parameterafhængighed.....</b>	<b>26</b>
Forsøg med effekt af opholdstid.....	26
Forsøg med effekt af iltniveau .....	35
Forsøg med effekt af substratniveau.....	38
<b>7. COD og BI<sub>5</sub> .....</b>	<b>41</b>
<b>8. Omsætning i biofilteret i produktionsenhed 3 .....</b>	<b>42</b>
<b>9. Rentabilitet af kvælstof-efterrensning på Modeldambrug .</b>	<b>43</b>
<b>10. Diskussion og sammenfatning .....</b>	<b>47</b>
Driftsforsøg .....	47
Parameterafhængighedsforsøg.....	47
Ammoniumtilsætning.....	49
Sammenligning af filtertyper .....	49
Denitrifikationsforundersøgelser .....	50
Konklusion.....	50
<b>11. Litteraturliste.....</b>	<b>52</b>
<b>12. Bilag til afsnit 6 "Forsøg med effekt af opholdstid" .....</b>	<b>54</b>
<b>13. APPENDIX. Tegning af pilot-filtre.....</b>	<b>58</b>

## 1. Indledning

Akvakultur er på globalt plan et hastigt voksende erhverv. Også i Danmark har såvel regering og folketing samt erhvervet selv fremlagt ambitiøse mål for sektorens vækst over det næste årti ("Handlingsplan for dansk fiskeri og akvakultur", [www.fiskeriudvikling.dk](http://www.fiskeriudvikling.dk)).

Det er imidlertid en forudsætning for denne vækst, at den kan ske uden negative miljømæssige konsekvenser.

Et af de oplagte svar på denne udfordring er anvendelsen af recirkulationsteknologi, hvorigennem vandforbruget reduceres drastisk, samtidigt med at intern rensning sikrer mulighederne for, at der kan ske en betydelig produktionsudvidelse inden for samme eller endog mindre udledning.

Baseret på disse principper har det i Dambrugsudvalget udviklede koncept, Modeldambrug (Pedersen *et al.* 2003), vist sig at være både kommercielt og miljømæssigt en succes. Der er derfor opstået et stort behov/ønske fra erhvervet om at ombygge flere dambrug til Modeldambrug, idet dette koncept i dag fremstår, som den umiddelbart mest farbare vej til forøget produktion på disse dambrug (Thomsen *et al.* 2005).

Fodertildelingen, som er bestemmende for den årlige produktion på et givent dambrug, fastlægges for modeldambrug ud fra dambrugets oprindelige fodertildeling ganget med en faktor for renseeffektiviteten på anlægget.

Renseeffektiviteten bestemmes som Rensegraden af henholdsvis kvælstof (N), fosfor (P) og organisk stof (BI<sub>5</sub>). Den af disse, som opnår lavest rensegrad vil forventeligt blive den bestemmende parameter for den fremtidige fodertildeling.

Eksempelvis er de opnåede rensegrader for 1. og 2. driftsår på Kongeåens Dambrug, et Modeldambrug type III under forsøgsordningen (uden mikrosigte), således (Svendsen *et al.*, 2008 b):

	Forventet	1. år	2. år
Organisk stof	75 %	95 %	93 %
Total fosfor	60 %	94 %	92 %
Total kvælstof (inkl. laguner)	27 %	68 %	54 %

Fodertilladelsen, som oprindeligt var på 438,2 t/år er i forbindelse med ombygningen til Modeldambrug under forsøgsordningen blevet forøget til 876,4 t/år.

Såfremt de i de to måleår opnåede resultater og rensegrader anvendes, vil den fremtidige fodertildeling - alene baseret på disse parametre - kunne blive således:

Fodertildeling (t/år)	Med 1. års rensegrader	Med 2. års rensegrader
Organisk stof	7.011	5.008
Fosfor	5.843	4.382
Kvælstof	1.274	886

Det fremgår således tydeligt, at det er kvælstoffjernelsen, som kan blive den begrænsende parameter for dambrugets fremtidige produktion. Tilsvarende vil det være for alle andre Modeldambrug, baseret på den hidtidige erfaring (Svendsen *et al.* 2008 a).

Udover den miljømæssige betydning kommer oveni det faktum, at de anlægsinterne ammonium-værdier ofte antager ganske høje værdier, ofte på et niveau som kan antages at have negativ effekt på f.eks. fiskevækst, foderudnyttelse og sygdomme/velfærd afhængig af bl.a. pH-forholdene.

For andre typer, fremtidige recirkulerede ørredopdrætsanlæg vil kvælstofomsætning og -fjernelse ligeledes være centralt, idet der også her vil kunne forekomme endog meget høje ammonium- og kvælstofværdier i opdrætsvandet samt i det udledte vand.

## Kvælstofomsætning

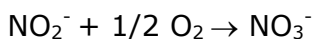
### Nitrifikation

I biofilteret sker en mikrobiel omsætning af fiskenes affaldsstoffer. Det ammonium, som fiskene udskiller, omdannes til nitrat (via nitrit) ved processerne, som samlet betegnes nitrifikation:

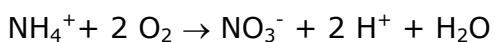
Ammonium-oxidation:



Nitrit-oxidation:



Nitrifikation - samlet:



I praksis er ammoniumoxidationen normalt det hastighedsbestemmende trin. Der forbruges 4 mol O pr. mol N, svarende til 4,57 g O<sub>2</sub>/g NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N. Under antagelse af, at alkaliniteten ikke er begrænsende for reaktionen (alkalinitet > ca. 5 ekv./m<sup>3</sup>), vil det normalt være ammonium eller opløst iltmængde i biofilmen, som er den begrænsende faktor for reaktionen (Henze *et al.* 2006).

Nitrifikanterne er autotrofe bakterier (anvender uorganisk kulstof som C-kilde) og konkurrerer med de heterotrofe bakterier (anvender opløst organisk kulstof som C-kilde) om plads og ilt i biofilmen. Da nitrifikanterne har væsentligt lavere væksthastighed, bliver mængden af opløst organisk stof betydende for balancen mellem de to bakterietyper. Det er derfor vigtigt at minimere indholdet af opløst organisk kulstof i vandet, hvis man ønsker at fremme nitrifikationen. For at opretholde en effektiv nitrifikation skal vandets BI<sub>5</sub> værdi generelt helst være under 5 mg/l ved en iltkoncentration på 6 mg/l (Arvin & Beck 1998).

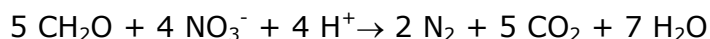
Kongeåens Dambrug har været et af de otte dambrug som deltog i Modeldambrugsforsøgsordningen (Svendsen *et al.* 2008 b), derfor har et omfattende måle- og dokumentationsprogram været gennemført i den toårige projektperiode fra april 2005 - april 2007. På Kongeåens Dambrug har BI<sub>5</sub> både op- og nedstrøms biofilteret generelt været under 5 mg/l (gennemsnitligt henholdsvis ca. 4,5 og 4 mg/l) under måle- og dokumentationsprojektet (Svendsen *et al.* 2008 b), mens iltniveauet nedstrøms produktionsenhed 3) gennemsnitligt i måleperioden har været  $6,1 \pm 1,4$  mg/l (svingende fra 2,6-8,6 mg/l). Iltniveauet har således i perioder været betydeligt under 6 mg O<sub>2</sub>/l i biofilteret.

### **Ammonifikation**

Det skal også nævnes, at ammonium kan dannes ved nedbrydning af organisk kvælstof, som hyppigst er på partikulær form. I praktisk dambrugsdrift, og i særdeleshed i Modeldambrug, vil denne proces dog kun have marginal betydning for kvælstofbalancen over produktionsenheden.

### **Denitrifikation**

Nogle mikroorganismer kan omdanne nitrat til atmosfærisk kvælstof ved den anaerobe proces, denitrifikation:



De fleste af de denitrificerende bakterier er fakultativt anaerobe (dvs. kan både leve aerobt og anaerobt), og anvender nitrat i stedet for ilt som elektronacceptor i elektrontransportkædens sidste led, såfremt ilt ikke er til stede.

Denitrifikationshastigheden afhænger af den energikilde, som benyttes. En letomsættelig energikilde som f.eks. methanol vil have en højere reaktionshastighed end f.eks. organisk stof i spildevand (Henze *et al.* 2006). En tilvænnning af biofilmen til kulstofkildens art og sammensætning må således forventes.

For at undgå substratbegrænsning af organisk stof og for at kunne kontrollere processen er det i praksis ofte nødvendigt at tilsætte en ekstern C-kilde, eksempelvis EPA-sprit, for at opnå optimal, kontrollerbar denitrifikation.

For at opnå optimal denitrifikation skal COD/NO<sub>3</sub>-N forhold være i størrelsesorden 3-6 (van Rijn *et al.* 2006). Dette forhold ser ud til at være opfyldt på Kongeåens Dambrug fra sommeren 2006 og fremefter (Svendsen *et al.* 2008 b).



## 2. Projektets baggrund og formål

Projektet udspringer af den kvælstofomsætningsproblematik som måle- og dokumentationsprojektet for Modeldambrug (Svendsen *et al.* 2008 a) har klarlagt, og projektet har det overordnede formål at undersøge mulighederne for at tilvejebringe en øget kvælstofomsætning.

Projektet blev gennemført som et praktisk studie på Kongeåens Dambrug i perioden november 2007 – marts 2008, hvor fire biofiltre med to forskellige biofiltermedietyper blev opsat til efterbehandling af vand fra en af de tre produktionsenheders udløb, dvs. inden udløb til plantelagunen (vist på figur 3.1).

Derefter gennemførtes projektets hovedformål:

- Måle effektiviteten og dokumentere kapaciteten af efterrensning af afløbsvand fra et modeldambrugs produktionsanlæg mht. omsætning af ammonium-N
- Vurdere stabiliteten af filtrenes drift over længere tid (ca. 3 måneder)
- Sammenholde to forskellige filtertypers renseevne; moving bed filtre overfor fastmedie-filtre med Bioblokke
- Måle omsætningsrater af ammonium
- Fastlægge parameterafhængighed:
  - Effekt af opholdstid
  - Effekt af iltniveau
  - Effekt af substratniveau

Projektoplægget omfattede oprindeligt forsøg med både nitrifikation (oxidation af ammonium til nitrat) og denitrifikation (reduktion af nitrat til frit kvælstof), men projektet har af bevillingsmæssige årsager kun omhandlet nitrifikation, samt indledende undersøgelser af de specifikke denitrifikationsforhold på dambruget. Det er håbet at kunne gennemføre denitrifikationsdelen i et efterfølgende projekt.

### 3. Beskrivelse af anlæg samt målemetoder

#### Kort beskrivelse af Kongeåens Dambrug

Kongeåens Dambrug er opført som et modeldambrug type III (Pedersen *et al.* 2003). Det består af 3 produktionsenheder, sættefiskanlæg og leveredamme. En principskitse af dambruget er vist på figur 3-1.

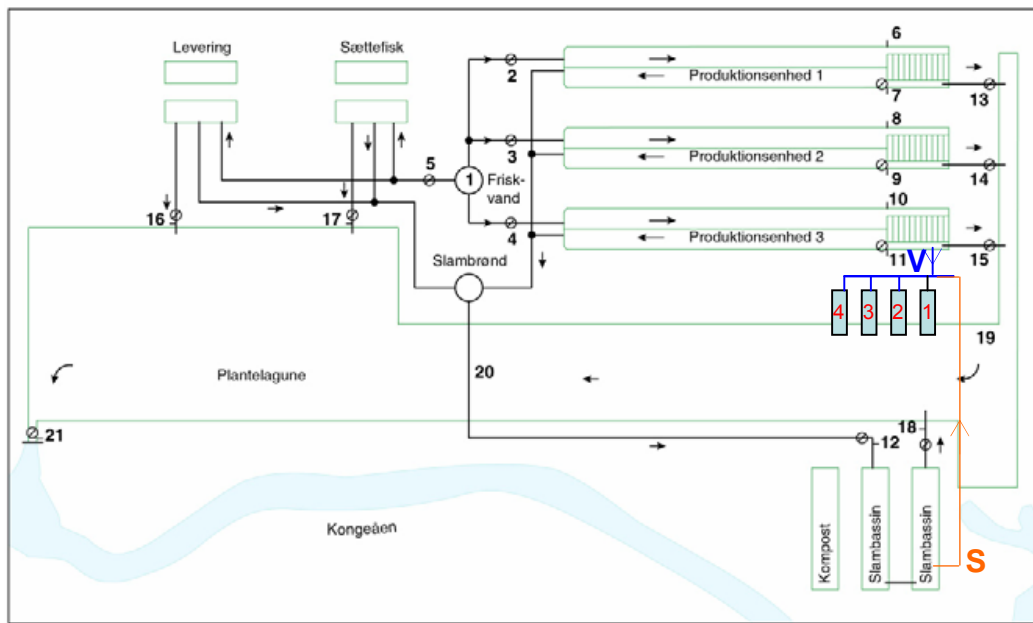
Produktionsenhederne består hver af 2 forbundne kanaler (12 sektioner i alt) eller raceways, hvor vandet bringes i cirkulation via belufter-brønde, som samtidig med ilttilførsel til vandet også løfter det nogle centimeter (air-lift princippet). Efter at have passeret fiskesektionerne i kanalerne ledes vandet gennem en mikrosigte til et biofilter (i 11 sektioner) med en beregnet overflade på 172.000 m<sup>2</sup>.

Vandet tages fra egen boring og omfangsdræn. Vandindtaget var gennemsnitligt 114 l/s (april 2006 – april 2007) og dambrugets totale vandvolumen er 22.800 m<sup>3</sup>.

Hver produktionsenhed er på 2.700 m<sup>3</sup>, og vandflowet i produktionsenheden er i gennemsnit målt til knap 800 l/s. Dvs. vandet løber rundt i produktionsenheden ca. en gang i timen. Vandskiftet ind og ud af hver produktionsenhed er i gennemsnit 29 l/s, hvilket giver en gennemsnitlig opholdstid på et døgn, og en recirkuleringsgrad på 95 % (Svendsen *et al.* 2008 b).

I hver sektion af produktionsenhederne opsamles fiskefækalier og foderrester i pyramideformede slamkegler. Det opsamlede slam pumpes sammen med biofilter-returskyllevand samt spulevand fra mikrosigte over i 2 slambassiner. Mikrosigterne, som er placeret umiddelbart opstrøms bilfiltrene er ikke vist på figur 2.1 og blev først opstillet i april 2007 umiddelbart efter afslutning af målingerne i dokumentationsprogrammet for modeldambrug. Klaret vand fra slambassinerne og afløbsvand fra produktionsenhederne ledes til en plantelagune (samlet 14.800 m<sup>2</sup> med middeldybde 0,9 m.). Efter plantelagunen løber vandet ud i Kongeåen. For yderligere detaljer om Kongeåens Dambrug henvises til Svendsen *et al.* 2008 b.

I den periode målinger i dette projekt blev foretaget (19.11.07-30.03.08) blev der i gennemsnit anvendt omkring 850 kg foder/dag i produktionsenhed 3. Fodring sker med pendulautomater, som fyldes/efterfyldes 2 gange dagligt (morgen og eftermiddag).



**Figur 3-1.** Principskitse over Kongeåens Dambrug med angivelse af pilotfiltrenes opstilling. V: Udløb anlægsvand til indløb af forsøgsfiltre. S: Klaret slamvand fra slambassin til forsøgsfiltre. Tallene 1 - 4 med rødt angiver forsøgsfiltrenes placering. Øvrige numre er målepunkter for modeldambrugs-projektet redegjort for i Svendsen *et al.* 2008 b.

### Projektets pilot-filtre på Kongeåens Dambrug

Fire filtre opbygget i 5.500 l cylindriske PE-beholdere blev opstillet i nærheden af produktionsenhed 3 på dambruget. Figur 3-1 viser, hvorledes en delstrøm fra afløbet af produktionsenhed 3 blev oprettet som indløbsvand til biofiltrene (angivet med V). Indløbsvandet løb i den samme streng til alle fire filtre. Der blev ligeledes etableret en streng med klaret slamvand fra slambassin til filterne (S i figur 3-1) til anvendelse ved efterfølgende denitrifikationsforsøg. Afløb fra filterne blev ledt til plantelagunens indløb (ikke vist på figur 3-1).

De to filtertyper var henholdsvis et moving bed filter med filterelementer af polypropylen (PP), Biomedia 850 (2H Kunststoff, Wetringen, Tyskland), og et fastmedie filter af polyethylen (PE) Bioblok 200 (Exponet, Hjørring, Danmark). Begge filtre blev lavet i duplikat og specifikationer er vist i tabel 3-1.

**Table 3-1.** Specifikationer for pilotfiltrene.

	<b>Moving Bed (MB)</b>	<b>Fastmedie (BB)</b>
	Filter 1 (MB I) Filter 3 (MB II)	Filter 2 (BB I) Filter 4 (BB II)
Tank volumen (l)	5.500	5.500
Filtermedie (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	850	200
Medie-volumen pr. filter (m <sup>3</sup> )	2	4,2
Medieoverflade pr. filter (m <sup>2</sup> )	1.700	840
Medievandfortrængning (l/m <sup>3</sup> )	170	180
Vandvolumen pr. filter (l)	5.160	4.744

Filtrene blev etableret som opstrømsfiltre, altså med vandtilgang i bunden og overløb. En tegning af forsøgsanlægget er gengivet i Appendix. I praksis blev filtrene placeret i følgende rækkefølge:

Filter 1: MB I (moving bed filter)

Filter 2: BB I (fastmedie filter, Bioblok)

Filter 3: MB II (moving bed filter)

Filter 4: BB II (fastmedie filter, Bioblok)

i stedet for parvis ens filtre ved siden af hinanden som vist på tegningen.

Denne rækkefølge gav mulighed for senere evt. at sætte MB og BB filtrene i serie.

En kapselblæser blev anvendt til at belufte filtrene via en fælles streng.

Iltniveauet i filtrene kunne således reguleres, men i praksis ikke ganske

uafhængigt af hinanden, hvis alle filtre var i drift samtidig. I BB filtre blev

luften fordelt gennem perforerede rør jævnt fordelt over hele bunden. I MB

filtre havde luftindblæsningen to funktioner; dels tilsætning af ilt for at drive

nitrifikationsprocesserne (som i BB) og dels at få filterelementerne til at

bevæge sig rundt. Bevægelsesdynamikken blev skabt ved at anbringe

luftdiffusorrør i en yderkrans nederst over den koniske bunds slutning samt i

en højere liggende (ca. 1/3 af tankhøjden oppe) mindre inderkrans.

Hvert filter havde en recirkulationspumpe, der dels kunne skabe filterintern

recirkulering, dels når der ikke blev recirkuleret kunne fungere som

boosterpumpe på indløbet, så indløbsmængden derved kunne øges fra max ca.

1,5 l/s til ca. 3,3 l/s pr. filter.

Vandure (elektromagnetiske flowmålere) målte kontinuerligt indløbsflow på hvert filter med en usikkerhed på 0,5 % ved målinger over 0,5 l/s.

Temperatur, pH og ilt blev målt med HQ40d Multimeter fra Hach (Hach-Lange,

Düsseldorf, Tyskland) ved indløb til filtrene, samt pH og ilt ved udløb af hvert

filter (i toppen). Ammoniumsensorer (WTW GmbH & Co. KG, Weilheim,

Tyskland) blev sat op i indløbet og i toppen af filtrene for kontinuerligt at

registrere ammoniumindholdet ind- og ud af hvert filter. Sensoren i indløbet

blev suppleret med en nitrat-elektrode ved en opgradering i december 2007.

## Prøveudtagning

ISCO-prøvetagere (Teledyne Isco Inc, Lincoln NE, USA type 6712-1) udtog prøver af:

1. indløbsvandet til filterne
2. klaret slamvand
3. ved udløb (i toppen) af hvert filter,

og opbevarede prøverne mørkt og ved 4° C.

Prøvetagerne tilkoblet filterne ses på billedet i figur 3-3a og b.



**Figur 3-3a.** Isco-prøvetagere tilkoblet pilotfilterne.



**Figur 3-3b.** Isco-prøvetager som udtager prøver i den 24-flasker-store prøvekarusel.

I 'opstartsperioden' (06.11.07 – 09.01.08) blev ISCO'en programmeret til at tage puljede døgnprøver á 200 ml hvert kvarter over et døgn, hvor hver time blev puljet pr. flaske. Til kemiske analyser blev indløbsprøver puljet á to timer. Vandprøver efter filtrene og slamvandsprøver blev puljet á fire timer.

I 'driftsperioden' (23.01.08 – 11.03.08) blev prøvetagerne programmeret til at udtage 800 ml prøve hver 6. time over tre døgn i to flasker (dvs. 12 målepunkter i alt). Prøverne blev konserveret med 4 M  $H_2SO_4$  (1 ml:100 ml) der var for-pipetteret i flaskerne. Kemiske analyser blev foretaget på flaske nr. to hver 6. time, idet den første flaske indeholdt lidt prøve fra forrige prøvegang, idet det ikke kunne undgås at der stod lidt vand tilbage i slangerne fordi prøvetageren stod lavere end prøveudtagsstedet.

Prøver udtaget ved forsøg udover ovennævnte blev taget manuelt som øjebliksprøver der øjeblikkeligt blev frosset ned til senere analyse.

### **Kemiske analyser**

Vandprøverne blev analyseret for ammonium (DS 224 modificeret efter Andersen et al., 2004), nitrit (DS 223 – uden reduktion af nitrat-delen) og nitrat (ISO 7890/1).

I udvalgte prøver eller forsøgsgange blev der yderligere også bestemt COD (ISO 15705),  $BI_5$  (DS 254), og Totalt-N (DS221 kombineret med ISO 7890/1).

## 4. Forsøgsoversigt

I nedenstående tabel (4-1) vises en oversigt over hvilke forsøg, der er kørt i hvilke perioder.

**Tabel 4-1.** Oversigt over forsøg udført i projektet

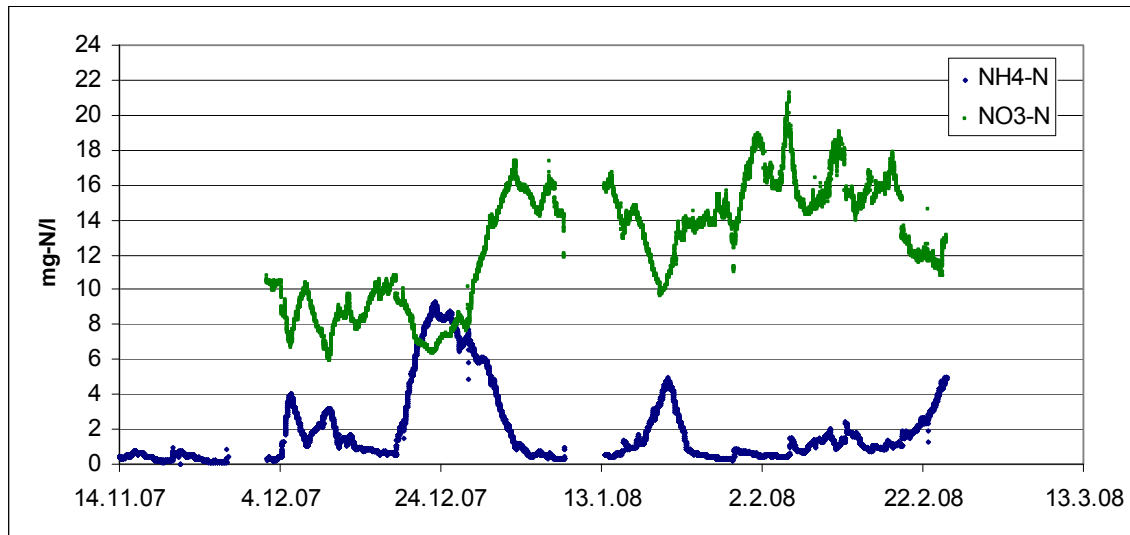
Forsøgstype	Periode	Moving bed Flow (l/s)	Bioblok Flow (l/s)	Tabel i rapporten	Prøvetype	COD / BI <sub>5</sub> analyser
Opstart	06.11.07-09.01.08	Ca .1,5	Ca .1,5	5-1	døgn	4 serier
Driftsforsøg	Uge 4 '08	1,4	1,4	5-2	Øjeblikksprøver over 3 dage	
	Uge 5	0,5	1,8			
	Uge 6	1,7	0,5			
Driftsforsøg med NH <sub>4</sub> -tilsætning	Uge 7	1,4	1,3	5-3	Øjeblikksprøver over 3 dage	
	Uge 8	3,3	3,3			
	Uge 9	1,7	0,5			
	Uge 10	0,5	1,7			
	Uge 11	1,5	1,4			
Opholdstidsforsøg	Uge 8	Flow fra 0,5 – 4 l/s	Flow fra 0,5 – 4 l/s	6-A1	øjeblikksprøver	2 serier
	Uge 9			6-B1 6-B2		
Iltforsøg (40-80 % iltmætning)	Uge 12		Ca. 2,0	6-4	øjeblikksprøver	
Substratforsøg (2,4-9,2 mg NH <sub>4</sub> -N/l)				6-6	øjeblikksprøver	

## 5. Målinger fra opstart af filtrene og til etableret stabil drift

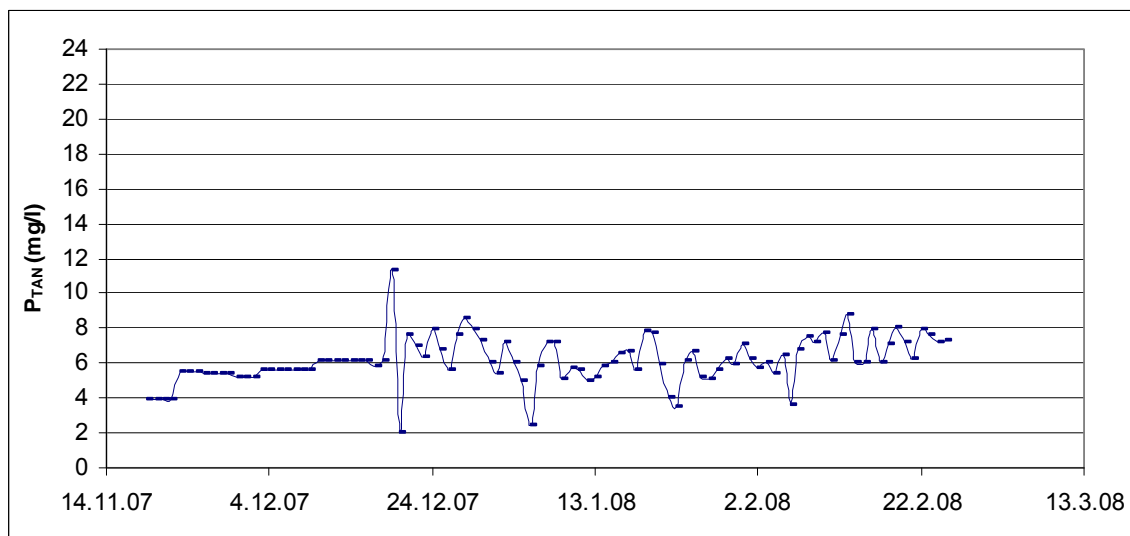
I dette afsnit beskrives de to filtertypers initielle rensningsevne fra opstart og til stabil drift. Indledningsvis giver ammoniumsensorens registreringer i indløbsvandet til filtrene et godt overblik over, hvorledes ammoniumudviklingen i produktionsenhed 3 har været i perioden (figur 5-1). I figur 5-2 er den tilsvarende ammoniumdannelse skønsmæssigt beregnet<sup>1</sup> ud fra den af dambruget angivne forbrugte foder mængde. Det ser ud til at den høje ammoniumkoncentration (fra 19.12.07-02.01.08) starter sammenfaldende med den høje foder mængde udfodret den 19.12.07, men driftsforhold i højtidsperioden kan også have betydning. Derimod kan ammoniumstigningerne omkring d. 04.12.07, 22.01.08 og 25.02.08 i afløbet fra produktionsenhed 3 (nedstrøms biofilteret heri) ikke forklares ud fra fodring mængder, men må formodentligt skyldes andre driftsforhold. De

<sup>1</sup>  $P_{TAN} = (F \cdot PC \cdot 0,092) / t$  (d), hvor F: foder mængde/t(d); PC: % proteinkoncentration i foderet;  $0,092 = 0,16 \cdot 0,8 \cdot 0,8 \cdot 0,9$  (16% protein er nitrogen, 80% nitrogen bliver optaget, 90% nitrogen bliver udskilt som TAN (+10% som urea), efter Timmons et al., 2002. Proteinkoncentrationen i foderet var 45%. Produktionsenhed 3 rummer 2700 m<sup>3</sup> med vandskifte på 35 l/s. TAN: Totalt ammonium nitrogen (dvs. NH<sub>3</sub> + NH<sub>4</sub><sup>+</sup>).

forbigående høje ammoniumkoncentrationer blev ikke opfattet som problematiske på dambruget i forhold til driften.



**Figur 5-1.** Ammonium og nitrat udviklingen i afløbet fra produktionsenhed 3 i projektets måleperiode.



**Figur 5-2.** Den teoretiske ammoniumdannelse udregnet på baggrund af udfodring.

### Opstartsperiode (november 2007 – januar 2008)

Der blev sat vand på pilotanlægget ultimo oktober 2007, hvorefter hvert filter blev podet med slam fra Skanderborg rensningsanlæg og pumperne blev startet den 7. november 2007.



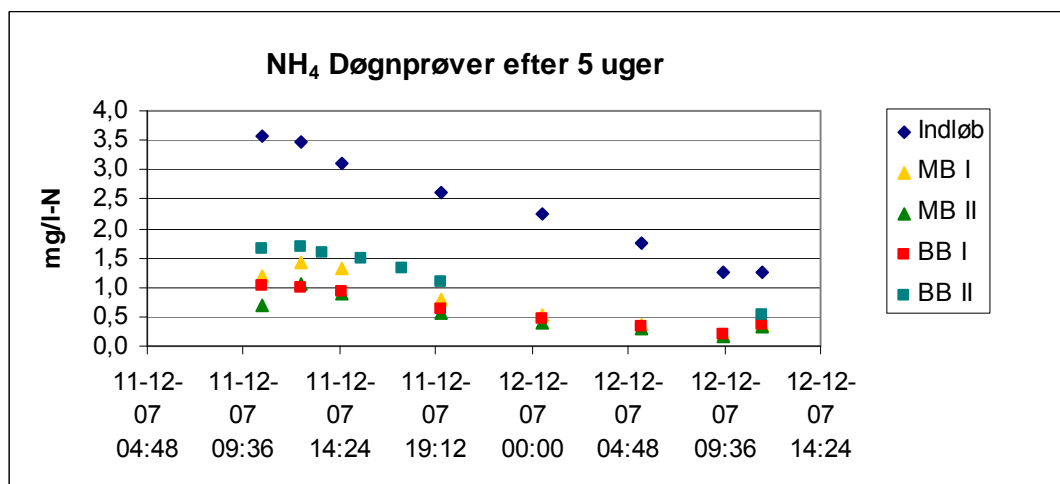
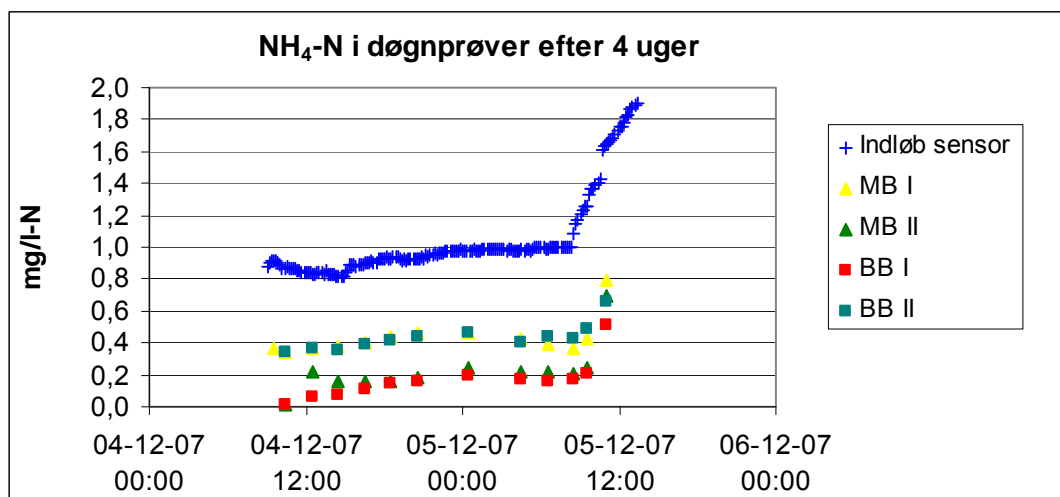
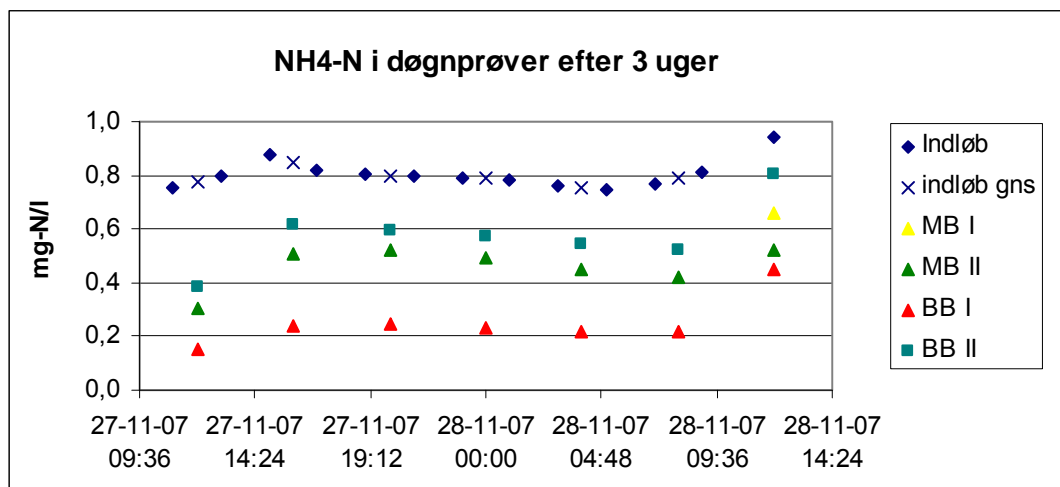
De to første uger ses ikke nogen signifikant renseseffekt af filtrene<sup>2</sup>, på nær forhøjet nitrit i et bioblok-filter (BB I) i anden uge. Efter 3 ugers forløb begyndte filtrene at omsætte ammonium (figur 5-3). Pga. defekt nippelmuffe til Isco-prøvetageren er der ingen døgnprøver fra MB I i 3. uge. Indløbsværdier fra 4. uge er vist som det ammoniumindhold ammoniumsensoren gav, idet dispenser-armen i prøvetageren til indløbsvandet var fastklemt og derfor ikke udtog vandprøver. Det ses af figuren at BB I er det filter, hvor der hurtigst etableres nitrificering og renses bedst. Efter 4 ugers forløb renses BB I og MB II bedst, og de er sammenlignelige med udløbskoncentrationer på gennemsnitligt  $0,16 \pm 0,07$  mg/l, hvorimod de to andre filtre ligger ca.  $0,25$  mg/l  $\text{NH}_4\text{-N}$  højere.

Flow, temperatur, pH og ilt målinger i opstartsfasen er vist i tabel 5-1.

**Tabel 5-1.** Flow, ilt, pH og temperatur i opstartsfasen.  
MB: Moving bed filter. BB: Fastmedie - Bioblok filter.

Dato		Indløb	MB I	MB II	BB I	BB II
22.11.07	Flow (l/s)		1,51	1,54	1,53	1,54
	O <sub>2</sub> (mg/l)	5,36	11,23	10,98	9,41	10,1
	pH	6,89	7,25	7,34	7,08	7,18
	Temp.°C	9,6				
28.11.07	Flow (l/s)		1,51	1,38	1,46	1,51
	O <sub>2</sub> (mg/l)		11,91	11,96	10,06	10,03
	pH		7,25	7,21	7,05	6,8
	Temp.°C	8,7				
05.12.07	Flow (l/s)		1,51	1,53	1,52	1,54
	O <sub>2</sub> (mg/l)	4,82	10,96	10,97	9,67	8,55
	pH	6,9	7,23	7,34	7,14	6,93
	Temp.°C	9,7	9,7	9,7	9,7	10,0
12.12.07	Flow (l/s)		1,5	1,5	1,5	1,5
	O <sub>2</sub> (mg/l)	6,31	11,66	11,7	9,93	9,58
	pH	6,82	7,28	7,38	7,11	7,08
	Temp.°C	9,2	9,1	8,9	9,0	9,0
19.12.07	Flow (l/s)		1,42	1,4	1,43	1,46
	O <sub>2</sub> (mg/l)	6,53	11,82	11,82	9,91	9,28
	pH	6,9	7,39	7,38	7,08	6,98
	Temp.°C	8,4	8,0	8,2	8,2	8,2
09.01.08	Flow (l/s)		1,5	1,57	1,63	1,54
	O <sub>2</sub> (mg/l)	5,44	9,89	10,82	11,48	9,18
	pH	6,71	7,01	7,11	7,23	6,95
	Temp.°C	8,1	7,9	7,9	7,8	7,9

<sup>2</sup> Målt som forskel i indløb i forhold til udløb fra filter med hensyn til nitrat og nitrit, da det ikke var muligt at analysere ammoniumindholdet i døgnprøverne p.g.a. formalininterferens fra dambrugets formalinbehandlinger.



**Figur 5-3.** Ammonium-N koncentrationer i indløb og afløb fra de fire biofiltre ved opstart. Differencen mellem ind- og udløb indikerer ammoniumomsætning i filtrene. MB: Moving bed filter. BB: Fastmedie - Bioblok filter.

Døgnsprøver fra 11.-12. december (5. prøveuge) ligner uge 4, men har højere ammoniumkoncentration i indløbsvandet (3,6 – 1,3 mg/l). MB I renser i sidste del af døgnet svarende til BB I og MB II. Prøvetager fra BB II tog ikke prøver om natten grundet frost.

Den 19. december var indløbskoncentrationen omkring 1,3 mg NH<sub>4</sub>-N/l, og på baggrund af 3 øjebliksprøver (taget med ca. 2 timers mellemrum) blev filteromsætningen (beregnet som ind-ud koncentration) målt til hhv. 0,96 ± 0,07 og 1,04 ± 0,16 mg/l for Moving Bed filtrene, og 0,98 ± 0,06 og 0,83 ± 0,06 mg/l for Bioblok-filtrene, hvor sidstnævnte med den laveste omsætning var fra filter BB II.

Den 9. januar '08 blev der taget 6 tidsforskudte øjebliksprøver (med ca. 1 time imellem prøverne). Ammonium i indløbsvandet lå i niveauet 1,1 – 1,4 mg N/l, og efter filtrene 0,3 – 0,4 mg N/l. Der var ingen signifikant forskel imellem filtrene (eller filtertyper) ved t-test, og ammoniumfjernelsen var udtrykt som ind – ud koncentration i mg N/l:

- Moving bed: MB I: 0,90 ± 0,08 og MB II: 0,95 ± 0,07
- Bioblok: BB I: 0,96 ± 0,19 og BB II: 0,91 ± 0,11

Svarende til 65-85 % ammonium-fjernelse ved flowhastigheden 1,6 l/s (dog 1,5 l/s for MB I). Temperaturen var 7,8 – 7,9 °C, og pH lå 6,95 – 7,23. Iltindhold i toppen af filtrene blev målt til henholdsvis 11,48 mg/l og 10,82 mg/l for MB I og MB II, samt 9,89 mg/l og 9,18 mg/l for BB I og BB II (tabel 5-1).

### **Driftsforsøg - Efterrensning (januar 2008 – marts 2008)**

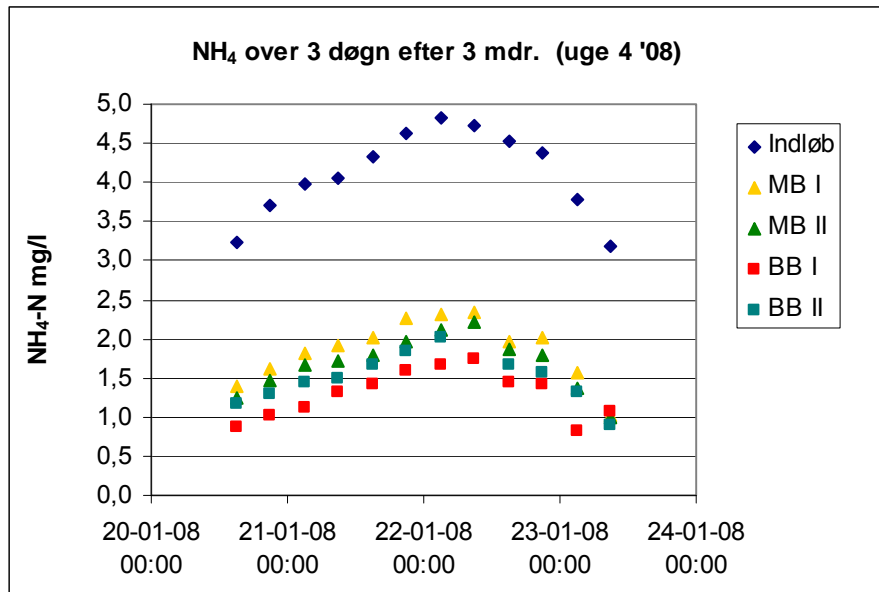
Efter ca. 3 måneders forløb vurderedes det, at filtrene alle udviste stabil renseseffektivitet. Øjebliksprøver taget over 3 døgn, efter drift i 11 uger<sup>3</sup>, ses i figur 3-4. Alle filtre havde et flow på 1,4 l/s, og ammoniumkoncentrationen i perioden var 3,2 – 4,8 mg N/l i indløbet. Koncentrationsforskellen (ind-ud) over filtrene for de 3 døgn var gennemsnitligt (mg N/l):

- Moving Bed; MB I: 2,26 ± 0,19 og MB II: 2,43 ± 0,21
- Bioblok; BB I: 2,82 ± 0,32 og BB II: 2,57 ± 0,27.

Filtrene med Bioblokke nitrificerede altså mere end Moving bed (signifikant på 5 % niveau ved t-test) målt som koncentrationsforskel over filtrene, om end forskellen var relativt lille (0,25 NH<sub>4</sub>-N mg/l).

---

<sup>3</sup> Dog uden beluftning i 3-4 dage i uge 10 grundet vand i blæseren.



**Figur 5-4.** Ammoniumomsætning i Moving bed (MB) og Bioblok-filtre (BB) efter 3 måneders drift. Målinger foretaget i uge 4 2008. MB: Moving bed filter. BB: Fastmedie - Bioblok filter.

De næste to uger blev flowet gennem filtrene varieret til henholdsvis minimum 0,5 l/s og maksimum (uden boosterpumper tændt) omkring 1,7 l/s for de to filtertyper, som vist i tabel 5-2.

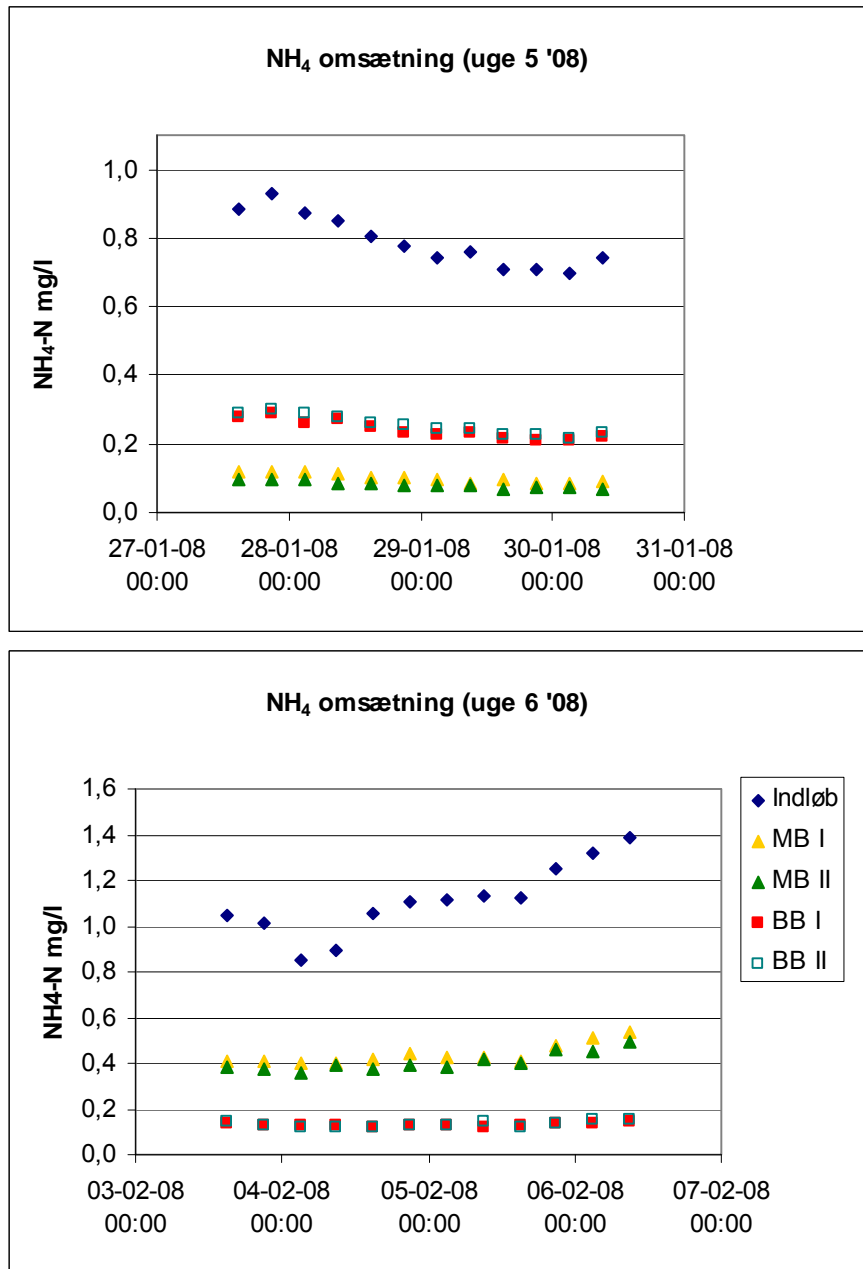
**Tabel 5-2.** Flow, ilt, pH og temperatur i Moving Bed (MB) -og Bioblok (BB) filtre ved efterrensning af afløbsvand fra produktionsenhed nr. 3.

	Indløb	MB (gns) ( $\pm$ stdafv)		BB (gns) ( $\pm$ stdafv)	
<b>Uge 4</b>					
Flow (l/s)		1,40	0,00	1,40	0,00
O <sub>2</sub> (mg/l)	6,69	10,80	0,87	9,72	0,17
pH	6,27	6,99	0,11	6,90	0,01
Temp. °C	7,8	7,55	0,21	7,55	0,07
NH <sub>4</sub> -N (mg/l)	4,11 $\pm$ 0,55	1,77	0,12	1,39	0,14
ind-ud (mg/l)		2,34	0,21	2,71	0,28
Omsat g/døgn		283	15	326	22
Omsat g/d/m <sup>2</sup>		0,17	0,01	0,39	0,03
% omsat		57	3	66	4
<b>Uge 5</b>					
Flow (l/s)		0,55	0,07	1,75	0,07
O <sub>2</sub> (mg/l)	6,36	12,13	0,26	10,03	0,20
pH	6,69	7,36	0,15	7,03	0,01
Temp. °C	8,2	7,95	0,07	8,05	0,07
NH <sub>4</sub> -N (mg/l)	0,79 $\pm$ 0,08	0,09	0,01	0,25	0,01
ind-ud (mg/l)		0,70	0,07	0,54	0,05
Omsat g/døgn		33	4	82	2
Omsat g/d/m <sup>2</sup>		0,02	0,00	0,10	0,00
% omsat		88	2	69	1
<b>Uge 6</b>					
Flow (l/s)		1,70		0,55	0,07
O <sub>2</sub> (mg/l)	6,89	10,78	0,50	11,25	0,10
pH	6,59	6,74	0,11	6,87	0,03
Temp. °C	7,7	7,70	0,00	7,70	0,14
NH <sub>4</sub> -N (mg/l)	1,11 $\pm$ 0,16	0,42	0,02	0,13	0,00
ind-ud (mg/l)		0,68	0,12	0,97	0,15
Omsat g/døgn		100	3	46	6
Omsat g/d/m <sup>2</sup>		0,06	0,00	0,06	0,01
% omsat		62	2	88	0

Omsætningen i filtrene ses i figur 5-5 og tabel 5-2. Der var ingen signifikant forskel mellem de samme filtertypers omsætning (ind-ud koncentrationer) for målinger uge 5 og 6, men naturligvis imellem de forskellige filtertyper, da flowet gennem dem var forskellige. Tabel 5-2 viser, at omsætningen under de målte forhold generelt er bestemt af indløbskoncentrationen til anlæggene. Den høje indløbskoncentration i uge 4 (med flow 1,4 l/s) bevirker at den bedste absolutte (g/d eller g/d/m<sup>2</sup>) rensning opnås her, selvom rensegraderne (målt i procent) er højere ved det højeste flow (1,7-1,8 l/s) for begge filtertyper (uge 5-6).

Ammoniumindløbskoncentrationen var 0,7 – 0,9 mg/l-N i uge 5, hvorimod den var 0,9 – 1,4 mg N/l i uge 6. Dette bør der derfor tages højde for ved eksempelvis sammenligning af Moving bed filternes målte forskel på 0,70  $\pm$

0,07 mg N/l i forhold til Bioblok-filtrenes  $0,97 \pm 0,15$  mg N/l ved den lave (0,5 l/s) flowhastighed. Procentvis opnåedes samme rensesgrad for de to filtertyper ved det lave flow på trods af koncentrationsforskellen.



**Figur 5-5.** Omsætning af ammonium i uge 5 og 6 med flow omkring 1,7 og 0,55 l/s for henholdsvis BioBlok filtre (BB) og Moving bed (MB) i uge 5, og omvendt i uge 6, som angivet i tabel 5-2. MB: Moving bed filter. BB: Fastmedie - Bioblok filter.

For at undgå at ammonium-omsætningshastigheden blev begrænset af indløbskoncentrationen, blev en ammoniumchloridopløsning tilsat indløbsvandet før filtrene (men efter afløb fra produktionsenheden).

### **“Driftsmålinger” med tilsætning af ammonium**

I 5 uger pågik forsøg med tilsætning af ekstra ammonium og varierende hydraulisk opholdstid, som angivet i tabel 5-3a. Hver uge blev 12 øjebliksprøver taget over 3 døgn (6 timers interval) med Isco-prøvetager. Doseringpumpen med ammoniumopløsningen blev ikke reguleret efter tilløbsflowene til filtrene, men ydede en konstant mængde, hvilket betyder at indløbskoncentrationerne ændredes noget med ændrede flowindstillinger. Den sidste prøveuge skyldes det høje ammoniumindhold dog, at en stærkere ammoniumopløsning blev tilsat for at sikre substratkoncentrationen.

#### **Resultater og diskussion af driftsmålinger**

Generelt ses omsætningsrater på 0,22-0,30 g N/m<sup>2</sup>/d for Moving Bed og 0,45-0,71 g N/m<sup>2</sup>/d for Bioblok filtrene (tabel 5-3b). Fælles for begge type filtre er, at den lange opholdstid ved flow ca. 0,5 l/s giver den laveste omsætning i forhold til de øvrige forsøg, men samtidigt findes også den højeste rensegrad (omkring 90 %). Den relativt lavere omsætning for MB i forhold til BB ved 0,5 l/s skal sammenholdes med den lavere ammoniumindløbskoncentration for MB. Hvad der er den begrænsende parameter ved flow 0,5 l/s, fremgår ikke tydeligt af de målinger som er foretaget, men substrattilførsel eller mangel på alkalinitet er et nærliggende bud, selvom der ikke synes at være klar indikation herpå i pH-målingerne. Da vandprøverne var syrekonservede kan man ikke skelne NO<sub>2</sub> fra NO<sub>3</sub> fraktionen, så en eventuel stigning i nitrit kan ikke identificeres. Den bedste overensstemmelse mellem NH<sub>4</sub>-N fjernelsesrate og NO<sub>23</sub>-N dannelsesrate findes netop ved 0,5 l/s (tabel 5-3 b og 5-3 c), tydende på minimum dannelse af øvrige N-fraktioner ved denne behandling.

Der er god reproducerbarhed i omsættelsesraterne imellem de samme typer af filtre. Er der lidt forskel, ser dette umiddelbart ud til at kunne forklares med divergerende iltniveauer. Eksempelvis for moving bed filtrene i uge 9, hvor ilten i MB I lå på 8,8 mg/l og i MB II på 10,3 mg/l med omsætningsraterne MB I: 0,26 og MB II: 0,32 g N/m<sup>2</sup>/d. Derfor kunne renseevnen i den sidste prøveuge formodentligt være øget yderligere, såfremt ren ilt var blevet suppleret til anlægget, idet luftblæseren ikke havde kapacitet til at hæve iltniveauet yderligere.

Det er bemærkelsesværdigt at MB og BB filtrene fjerner næsten samme mængde ammonium-N pr. dag, når der ikke tages højde for overfladeareal. Specielt i de to første prøveuger, hvor driftsbetingelserne er ens filtrene imellem; MB: 382 ± 17 g NH<sub>4</sub>-N/d og BB: 380 ± 8 g NH<sub>4</sub>-N/d.

**Table 5-3a.** Flow, ilt, pH og temperatur målt i driftsforsøg med NH<sub>4</sub>-tilsætning. Værdier aflæst manuelt, eller logget hvert 15. minut for værdier, hvor standardafvigelse er angivet. MB: Moving bed filter. BB: Fastmedie - Bioblok filter.

	Indløb	MB I	MB II	BB I	BB II
<b>Uge 7 (13.02.08)</b>					
Flow (l/s)		1,3	1,4	1,3	1,3
Opholdstid (min)		67	63	60	60
O <sub>2</sub> (mg/l)	6,74	9,79	11,07	8,92	9,52
pH	6,68	6,43	6,76	6,59	6,66
Temp.°C	8,2	7,9	8,0	8,0	8,1
<b>Uge 8 (20.02.08)</b>					
Flow (l/s)		3,3	3,2	3,3	3,4
Opholdstid (min)		26	27	24	23
O <sub>2</sub> (mg/l)	6,51	9,26	10,37	8,18	8,57
pH	6,88	6,87	6,94	6,83	6,83
Temp.°C	8,7	8,8	8,8	8,8	8,7
<b>Uge 9 (27.02.08)</b>					
Flow (l/s)		1,74 ± 0,07	1,74 ± 0,06	0,53 ± 0,01	0,51 ± 0
Opholdstid (min)		49	49	149	155
O <sub>2</sub> (mg/l)	7,33	8,78	10,26	9,76	10,35
pH	6,85	6,77	6,88	6,63	6,7
Temp.°C	8,2	8,3	8,3	8,1	8,2
<b>Uge 10 (05.03.08)</b>					
Flow (l/s)		0,5 ± 0,01	0,5 ± 0,01	1,68 ± 0,03	1,7 ± 0,03
Opholdstid (min)		172	172	47	47
O <sub>2</sub> (mg/l)	7,31	11,85	11,82	10,15	9,8
pH	6,7	6,95	6,89	6,7	6,64
Temp.°C	7,8	7,8	7,9	7,9	7,9
<b>Uge 11 (11.03.08)</b>					
Flow (l/s)		1,48 ± 0,02	1,47 ± 0,02	1,39 ± 0,03	1,40 ± 0,03
Opholdstid (min)		58	59	57	56
O <sub>2</sub> (mg/l)	6,01	9,46 ± 0,15	9,04 ± 0,05	7,89 ± 0,09	6,82 ± 0,05
pH	6,81	5,99 ± 0,33	6,61 ± 0,07	6,44 ± 0,01	6,48 ± 0,01
Temp.°C	8,1	8,19 ± 0,25	8,08 ± 0,24	8,18 ± 0,25	8,05 ± 0,11



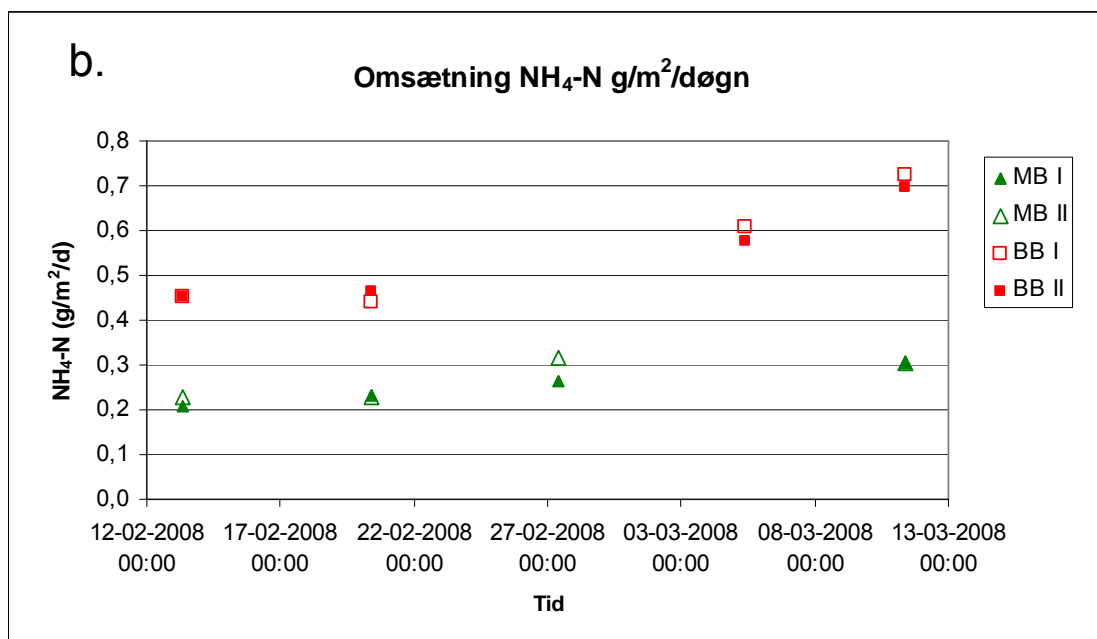
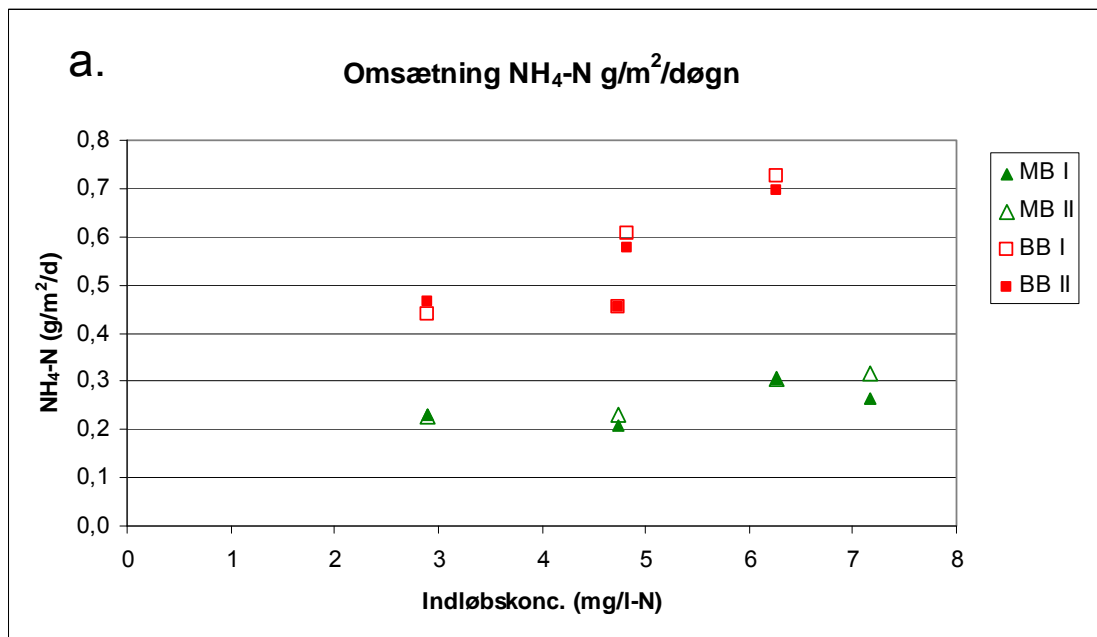
**Table 5-3b.** Flow og NH<sub>4</sub>-omsætning målt i driftsforsøg med NH<sub>4</sub>-tilsætning.  
 MB: Moving bed filter. BB: Fastmedie - Bioblok filter.

	<b>Indløb</b>	<b>MB I</b>	<b>MB II</b>	<b>BB I</b>	<b>BB II</b>
<b>Uge 7 (13.02.08)</b>					
Flow (l/s)		1,3	1,4	1,3	1,3
NH <sub>4</sub> -N mg/l	4,73 ± 0,27	1,51 ± 0,15	1,40 ± 0,13	1,43 ± 0,18	1,40 ± 0,14
ind-ud, mg/l		3,22 ± 0,15	3,30 ± 0,14	3,33 ± 0,17	3,33 ± 0,16
<b>Omsat g/døgn</b>		<b>356</b>	<b>391</b>	<b>380</b>	<b>380</b>
<b>Omsat g/m<sup>2</sup>/døgn</b>		<b>0,21</b>	<b>0,23</b>	<b>0,45</b>	<b>0,45</b>
% omsat		68	70	71	70
<b>Uge 8 (20.02.08)</b>					
Flow (l/s)		3,3	3,2	3,3	3,4
NH <sub>4</sub> -N mg/l	2,89 ± 0,10	1,52 ± 0,046	1,49 ± 0,04	1,60 ± 0,07	1,57 ± 0,06
ind-ud, mg/l		1,37 ± 0,07	1,41 ± 0,09	1,30 ± 0,05	1,32 ± 0,05
<b>Omsat g/døgn</b>		<b>391</b>	<b>389</b>	<b>369</b>	<b>389</b>
<b>Omsat g/m<sup>2</sup>/døgn</b>		<b>0,23</b>	<b>0,23</b>	<b>0,44</b>	<b>0,46</b>
% omsat		47	49	45	46
<b>Uge 9 (27.02.08)</b>					
Flow (l/s)		1,74	1,74	0,53	0,51
NH <sub>4</sub> -N mg/l	7,17 ± 0,51	4,18 ± 0,40	3,60 ± 0,36	0,69 ± 0,04	0,61 ± 0,04
ind-ud, mg/l		2,98 ± 0,76	3,57 ± 0,18	6,48 ± 0,47	6,56 ± 0,46
<b>Omsat g/døgn</b>		<b>448</b>	<b>536</b>	<b>297</b>	<b>289</b>
<b>Omsat g/m<sup>2</sup>/døgn</b>		<b>0,26</b>	<b>0,32</b>	<b>0,35</b>	<b>0,34</b>
% omsat		42	50	90	92
<b>Uge 10 (05.03.08)</b>					
Flow (l/s)		0,5 ± 0,01	0,5 ± 0,01	1,68 ± 0,03	1,7 ± 0,03
NH <sub>4</sub> -N mg/l	4,82 ± 0,49	0,59 ± 0,06	0,56 ± 0,08	1,42 ± 0,34	1,82 ± 0,56
ind-ud, mg/l		4,22 ± 0,43	4,30 ± 0,40	3,52 ± 0,33	3,30 ± 0,54
<b>Omsat g/døgn</b>		<b>182</b>	<b>186</b>	<b>510</b>	<b>485</b>
<b>Omsat g/m<sup>2</sup>/døgn</b>		<b>0,11</b>	<b>0,11</b>	<b>0,61</b>	<b>0,58</b>
% omsat		88	89	73	68
<b>Uge 11 (11.03.08)</b>					
Flow (l/s)		1,48 ± 0,02	1,47 ± 0,02	1,39 ± 0,03	1,40 ± 0,03
NH <sub>4</sub> -N mg/l	6,27 ± 0,39	2,23 ± 0,23	2,21 ± 0,32	1,20 ± 0,15	1,44 ± 0,20
ind-ud, mg/l		4,04 ± 0,33	4,06 ± 0,37	5,07 ± 0,33	4,83 ± 0,33
<b>Omsat g/døgn</b>		<b>517</b>	<b>516</b>	<b>609</b>	<b>585</b>
<b>Omsat g/m<sup>2</sup>/døgn</b>		<b>0,30</b>	<b>0,30</b>	<b>0,73</b>	<b>0,70</b>
% omsat		64	65	81	77

**Table 5-3c.** Flow og NO<sub>2+3</sub>-dannelse målt i driftsforsøg med NH<sub>4</sub>-tilsætning.  
MB: Moving bed filter. BB: Fastmedie - Bioblok filter.

	Indløb	MB I	MB II	BB I	BB II
<b>Uge 7 (13.02.08)</b>					
Flow (l/s)		1,3	1,4	1,3	1,3
NO <sub>2+3</sub> -N (mg/l)	15,33 ± 0,66	17,85 ± 0,49	18,05 ± 0,64	18,24 ± 0,63	18,44 ± 0,67
Ud-ind (mg/l)		2,52 ± 0,24	2,72 ± 0,15	2,91 ± 0,29	3,11 ± 0,29
Dannet g/døgn		278	322	332	355
Dannet g/m <sup>2</sup> /døgn		0,16	0,19	0,40	0,42
<b>Uge 8 (20.02.08)</b>					
Flow (l/s)		3,3	3,2	3,3	3,4
NO <sub>2+3</sub> -N (mg/l)	14,98 ± 0,59	16,27 ± 0,62	16,08 ± 0,55	16,09 ± 0,54	16,12 ± 0,63
Ud-ind (mg/l)		1,29 ± 0,20	1,10 ± 0,25	1,11 ± 0,16	1,14 ± 0,17
Dannet g/døgn		368	304	316	335
Dannet g/m <sup>2</sup> /døgn		0,22	0,18	0,38	0,40
<b>Uge 9 (27.02.08)</b>					
Flow (l/s)		1,74	1,74	0,53	0,51
NO <sub>2+3</sub> -N (mg/l)	11,38 ± 0,48	14,04 ± 0,58	14,81 ± 0,63	17,81 ± 0,77	18,09 ± 0,73
Ud-ind (mg/l)		2,66 ± 0,91	3,43 ± 0,24	6,43 ± 0,49	6,71 ± 0,45
Dannet g/døgn		400	516	295	296
Dannet g/m <sup>2</sup> /døgn		0,24	0,30	0,35	0,35
<b>Uge 10 (05.03.08)</b>					
Flow (l/s)		0,5 ± 0,01	0,5 ± 0,01	1,68 ± 0,03	1,7 ± 0,03
NO <sub>2+3</sub> -N (mg/l)	14,75 ± 0,87	18,63 ± 0,51	18,74 ± 0,49	17,85 ± 0,81	17,60 ± 0,95
Ud-ind (mg/l)		3,88 ± 0,60	3,99 ± 0,51	3,10 ± 0,23	2,89 ± 0,07
Dannet g/døgn		168	173	450	424
Dannet g/m <sup>2</sup> /døgn		0,10	0,10	0,54	0,50
<b>Uge 11 (11.03.08)</b>					
Flow (l/s)		1,48 ± 0,02	1,47 ± 0,02	1,39 ± 0,03	1,40 ± 0,03
NO <sub>2+3</sub> -N (mg/l)	12,51 ± 0,64	16,22 ± 0,54	16,15 ± 0,47	17,25 ± 0,63	16,92 ± 0,53
Ud-ind (mg/l)		3,70 ± 0,15	3,63 ± 0,19	4,73 ± 0,14	4,41 ± 0,17
Dannet g/døgn		474	462	568	533
Dannet g/m <sup>2</sup> /døgn		0,28	0,27	0,68	0,63

I figur 5-6a er den specifikke omsætningsrate afbilledet som funktion af indløbskoncentrationen, hvorfra det umiddelbart kunne se ud som om at Bioblok-filtrene stadig var koncentrationsbegrænsede. Men i figur 5-6b ses omsætningshastigheden som funktion af prøvetidspunkt, og det ses at filtrene bliver bedre til at omsætte med tiden. Koncentrationsafhængigheden kan derfor ikke entydigt fastsættes, da den således forsøgsmæssigt er konfunderet med prøvetidspunkt. Som det fremgår af tabel 5-3a var der ingen temperaturstigning i perioden, hvor temperaturen lå ret konstant omkring 8° C. Normalt antages en proportional stigning i omdannelse at ske fra 0 – 3 mg/l ammonium-N (Timmons *et al.* 2002), hvorefter afhængigheden af substratkoncentrationen forsvinder.



**Figur 5-6 a.** Indløbskoncentrationens betydning for den overfladespecifikke ammoniumomsætning. **b.** Den overfladespecifikke omsætning som funktion af måletidspunkt. MB: Moving bed filter. BB: Fastmedie - Bioblok filter.

## 6. Undersøgelse af parameterafhængighed

I de næste tre afsnit beskrives forsøg, hvor effekt af opholdstid, iltbegrænsning og substratbegrænsning blev undersøgt specifikt. De to sidstnævnte forsøg blev kun gennemført for fastmediefiltre (Bioblok), da hidtidige forsøg ikke viste afgørende forskel på processer og rensegrader i de to forskellige filtertyper.

### Forsøg med effekt af opholdstid

Forsøg med varierende flow / opholdstid blev afviklet over to dage i to prøveperioder, henholdsvis 20.-21. februar 2008 (Forsøg A) og 11.-12. marts 2008 (Forsøg B). De 5 forskellige flow med tilhørende opholdstider ses i tabel 6-1. Forsøget med 4 l/s (ca. 20 min. opholdstid) er delt i to (5 I og 5 II) da pumpekapaciteten ikke var tilstrækkelig til at kunne yde 4 l/s til alle fire filtre samtidigt. Tabellen viser også, at forsøgsrækkefølgen ikke var sammenfaldende forsøg A og forsøg B imellem.

**Tabel 6-1.** Forsøgsrækkefølge, flow og opholdstid for opholdstidsforsøg.

<b>Forsøg A</b>			<b>Opholdstid*, minutter</b>			
Forsøgsnr.	Rækkefølge	Flow (l/s)	MB I a	MB II a	BB I a	BB II a
1	1	1	85	85	78	77
2	2	0,5	167	173	155	157
3	3	2	42	43	39	39
4	4	3	29	29	26	26
5 I	5	4	21	21		
5 II	6	4			20	20

\*)Baseret på 2 flowværdier (aflæst v.start og slut)

<b>Forsøg B</b>			<b>Opholdstid*, minutter</b>			
Forsøgsnr.	Rækkefølge	Flow (l/s)	MB I b	MB II b	BB I b	BB II b
1	4	1	85	85	76	77
2	3	0,5	172	168	154	153
3	2	2	43	43	39	39
4	1	3,1	28	28	25	26
5 I	5	4	22	21		
5 II	6	4			20	20

\*)Baseret på flowværdier, logget hvert 10.min

Doseringspumpen, der supplerede ammoniumblandingen til indløbsvandet, blev sat til 2 l/t, hvor flowet til alle filtre var ca. 1,5 l/s. Doseringpumpeydelsen blev ikke varieret med hovedflowet til filtrene, hvilket gav noget varierende indløbskoncentrationer (tabel 6-A1 og 6-B1 i

bilag). Ammoniumblandingen til forsøg A og B indeholdt henholdsvis ca. 29 og ca. 59 g  $\text{NH}_4\text{-N}$  /l. Ammoniumkoncentrationen i indløbsvandet før tilsætningen var 1,8 – 2,2 mg N/l i Forsøg A og 0,8-0,9 mg N/l i Forsøg B.

Til hver forsøgsgang blev driftsperioden mellem stabilt flow opnåedes og prøveudtagning, sat til 3 × opholdstiden i det pågældende forsøg. Derefter blev der udtaget 5 øjeblikksprøver i toppen af hvert filter og før filtrene med ca. 5 minutters interval. Dog var tiden mellem flowindstilling og prøveudtagning i forsøgsnr. 2 (for begge forsøg A og B) udvidet til ca. 11-12 t (natten over).

### **Resultater og diskussion af opholdstidsforsøg**

Omsætningen af ammonium til nitrit og nitrat ses i figur 6-1 samt i tabel 6-A1 og B1 i bilag. Ilt, pH og temperatur logget under forsøgene er vist i figur 6-2 og figur 6-3 (samt i tabel 6-A2 og B2 i bilag).

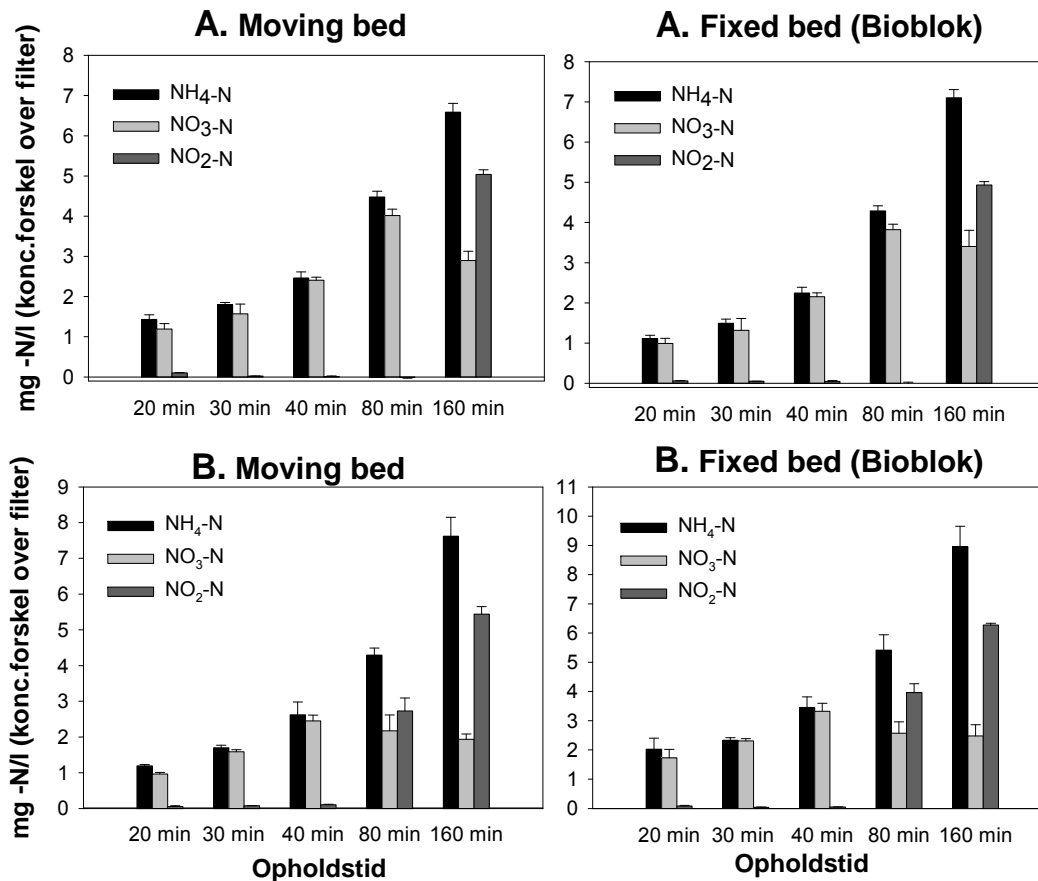
I filtrene omsættes ammonium helt til nitrat (figur 6-1) og kun en lille del (0,2-0,3 mg N/l) kun til nitrit, med undtagelse af forsøg med lang opholdstid (ca. 160 min / flow 0,5 l/s) og ca. 80 min opholdstid / flow 1 l/s i forsøg B, hvor nitrit akkumuleres og ikke omsættes til nitrat. Ved 0,5 l/s bliver ammoniumkoncentrationen i indløbsvandet så høj, at alkaliniteten bliver begrænsende for omsætningen, og omsætningen medfører et markant pH fald (figur 6-2 og 6-3; pH). Alkaliniteten blev målt inden forsøgsstart i forsøg B til 1,22 meq/l, hvilket rent støkiometrisk er tilstrækkeligt til 8,7 mg  $\text{NH}_4\text{-N}$ /l, en værdi der som tabel 6-A1 og 6-B1 (i bilag) viser kun overskrides ved flow 0,5 l/s ( $\text{NH}_4\text{-N}$  i indløb; 9,56 mg/l (A) og 17,44 (B)). Det er dog nærliggende at antage, at alkaliniteten også vil være begrænsende for omsætningen ved 1 l/s i forsøg B ( $\text{NH}_4\text{-N}$  i indløb; 8,43 mg/l), således at alkalinitetsbegrænsningen skal holdes for øje ved flow 0,5 og 1 l/s ved bedømmelse af maksimal omsætningskapacitet (tabel 6-3).

I figur 6-4 er koncentrationsforskellen over filtrene afbildet som funktion af opholdstiden. Figuren viser at sammenhængen mellem de tre laveste opholdstider falder på en linie, hvilket bekræfter at de alle udviser en konstant omsætningshastighed, hvorimod de to længste opholdstider ikke helt kommer op på samme hastighed. Det ses også, at fjernelse af ammonium tilsvarende nitratdannelse. I tabel 6-2 er hældningskoefficienterne til den lineære sammenhæng mellem de tre laveste opholdstider (20-43 min) angivet for filtertyperne i hvert forsøg for både ammonium og nitrat.

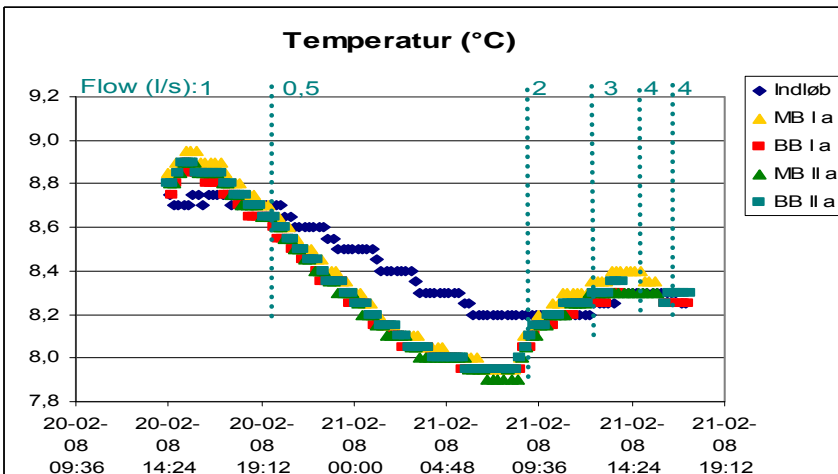
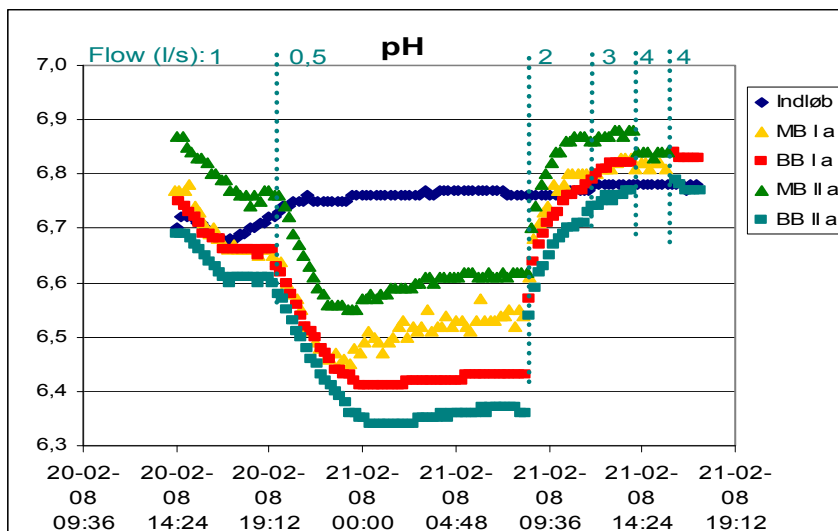
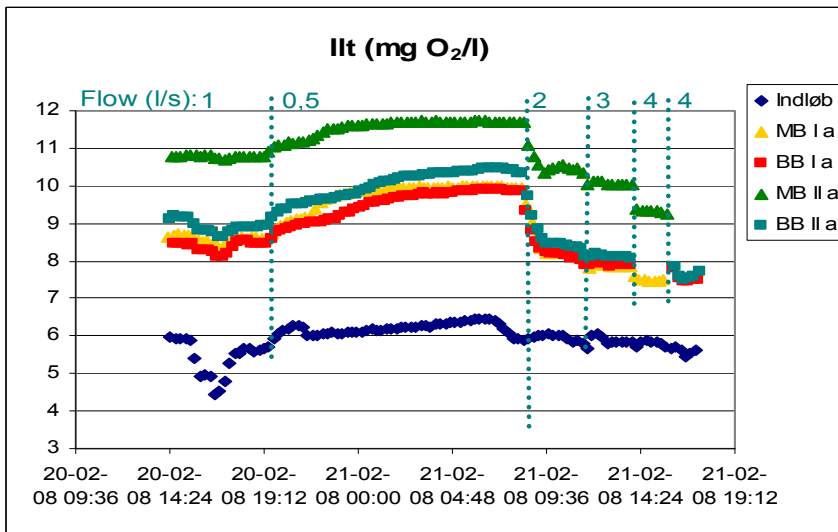
Alkalinitetsbegrænsende forhold ved 1 l/s understøttes i forsøg A ved det observerede pH fald (ca. 0,1 pH enhed). Årsagen til at dette fald ikke registreres ved flow 1 l/s i forsøg B kan skyldes de uens forsøgsrækkefølger de to forsøgsgange imellem. I forsøg B ligger forsøg med flow 1 l/s lige efter forsøg med flow 0,5 l/s, hvilket betyder at pH ikke formår at komme op til udgangspunktet (før 0,5 l/s-forsøget) igen, på trods af akklimatisering i 3 x opholdstid (4,33 timers) tilpasning. I forsøg A ligger 2 l/s flow-forsøget efter 0,5 l/s flowforsøget, og her "genetableres" pH udgangspunktet fra før 0,5 l/s-

forsøget, sammenfaldende med at der ikke ophobes nitrit eller er alkalitetsbegrænsning.

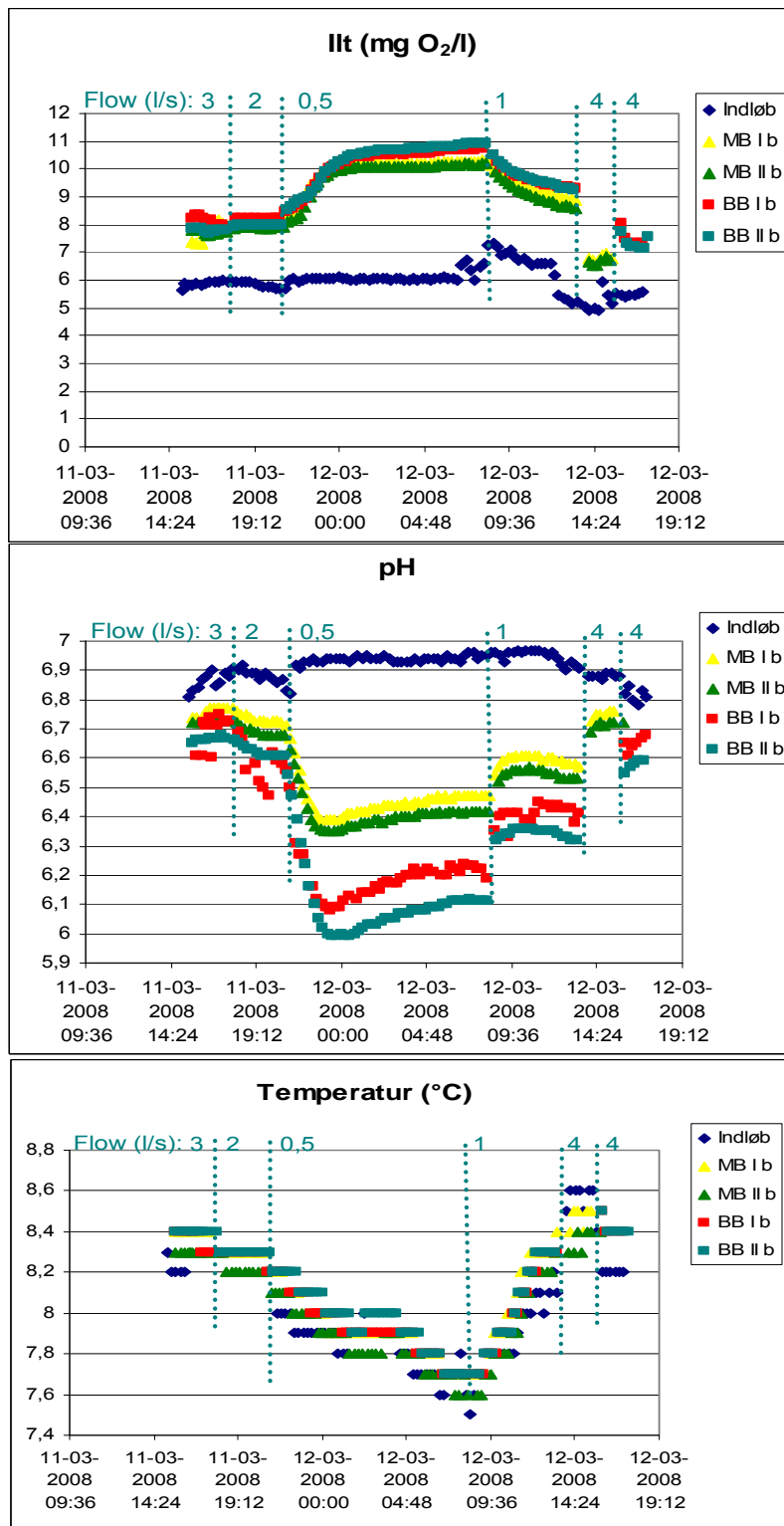
Det kan ikke udelukkes at stressforholdene (relativt højt ammoniumindhold i biofilmen i forhold til ilt) ved flow 0,5 l/s i forsøg B har effekt på den efterfølgende 1 l/s behandling.



**Figur 6-1.** Omsætning af ammonium til nitrit og nitrat målt som koncentrationsforskel over filteret for henholdsvis moving bed filtre og fastmedie filtre (Bioblok) i forsøg A øverst (A) og forsøg B nederst (B).

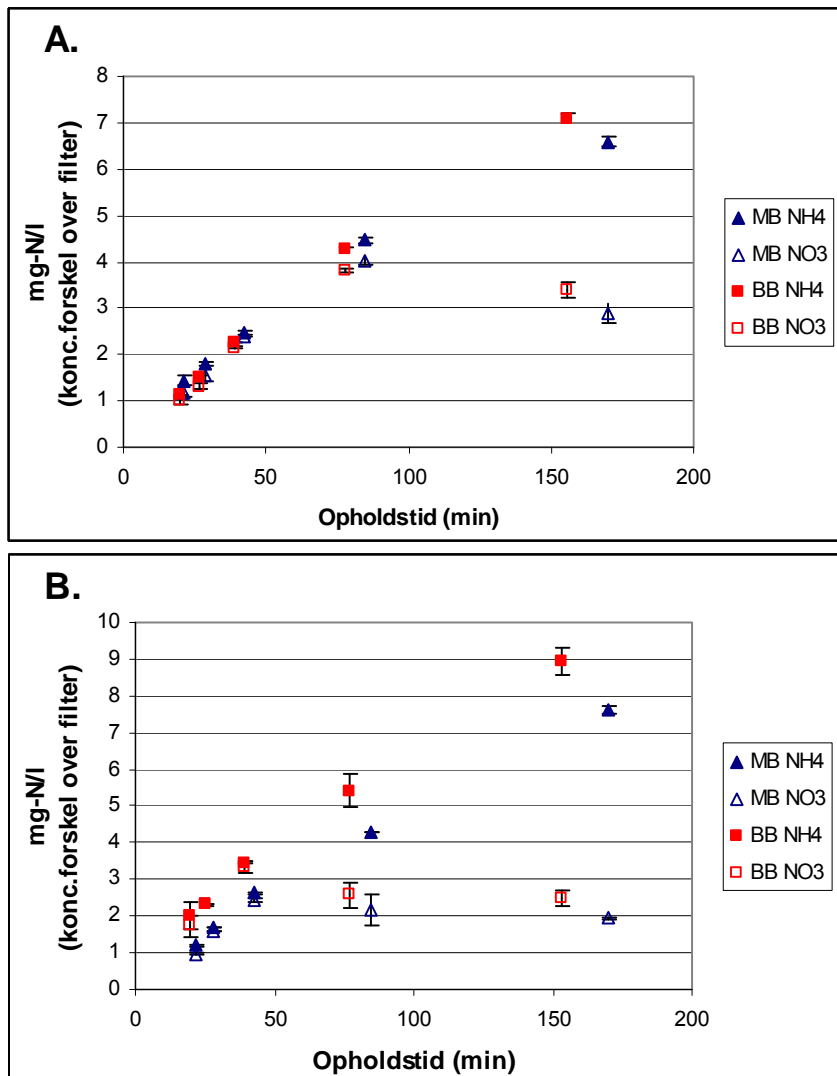


**Figur 6-2.** Ilt, pH og temperatur forløb i forsøg A.  
 MB: Moving bed filter. BB: Fastmedie - Bioblok filter.



**Figur 6-3.** Ilt, pH og temperatur forløb i forsøg B.  
 MB: Moving bed filter. BB: Fastmedie - Bioblok filter.





**Figur 6-4.** Koncentrationsforskel over moving bed (MB) og Bioblok fastmedie filtre for ammonium og nitrat i forsøg A øverst (A) og forsøg B nederst (B). MB: Moving bed filter. BB: Fastmedie - Bioblok filter.

**Table 6-2.** Hældningskoefficienter  $\alpha$  (mg-N/min opholdstid) til den retliniede sammenhæng mellem de tre laveste opholdstider i figur 6-4.

	$\alpha(\text{NH}_4\text{-N})$	$r^2$	$\alpha(\text{NO}_3\text{-N})$	$r^2$
MB a	0,049	1	0,058	0,998
BB a	0,06	0,9999	0,062	0,995
MB b	0,066	0,997	0,067	0,983
BB b	0,075	0,992	0,08	0,995

MB: Moving bed, BB: Bioblok, a: Forsøg A, b: Forsøg B

**Table 6-3.** Målte ammoniumomsætningskapaciteter per filter (g/døgn) og overfladespecifikt (g/m<sup>2</sup>/døgn), samt rensegrader (% omsat af indløbskoncentrationen).

**Ammoniumomsætning, g/døgn.**

Flow (l/s)	Forsøg A				Forsøg B			
	MB I	MB II	BB I	BB II	MB I	MB II	BB I	BB II
0,5	289	287	310	312	327	339	387	413
1	389	397	375	380	376	375	455	508
2	428	432	392	391	455	452	600	606
3	455	471	375	399	449	453	633	619
4	468	523	377	389	409	417	613	799

**Ammoniumomsætning, g/m<sup>2</sup>/d**

Flow (l/s)	Forsøg A				Forsøg B			
	MB I	MB II	BB I	BB II	MB I	MB II	BB I	BB II
0,5	0,17	0,17	0,37	0,37	0,19	0,20	0,46	0,49
1	0,23	0,23	0,45	0,45	0,22	0,22	0,54	0,60
2	0,25	0,25	0,47	0,47	0,27	0,27	0,71	0,72
3	0,27	0,28	0,45	0,47	0,26	0,27	0,75	0,74
4	0,28	0,31	0,45	0,46	0,24	0,25	0,73	0,95

**% ammonium omsat i filter**

Flow (l/s)	Forsøg A				Forsøg B			
	MB I	MB II	BB I	BB II	MB I	MB II	BB I	BB II
0,5	74	76	72	72	51	51	60	68
1	68	70	74	75	43	44	50	53
2	60	61	55	55	56	56	73	74
3	48	50	39	42	48	48	66	66
4	32	35	26	26	24	25	35	45

Normalt tilskrives inhibering af nitritoxiderende bakterier (NOB) et for højt indhold af frit NH<sub>3</sub> eller HNO<sub>2</sub>. Dog kan de højeste NH<sub>3</sub> og HNO<sub>2</sub> koncentrationer i forsøgene med opholdstid beregnes til at være henholdsvis 0,024 og 0,018 mg N/l, hvilket er noget under koncentrationen på 0,1-1 mg NH<sub>3</sub>-N/l henholdsvis 0,06-0,85 mg HNO<sub>2</sub>-N/l, der er beskrevet som inhiberende koncentrationer for NOB i spildevand (Ganigué *et al.* 2007, Pambrun *et al.* 2008). NOB i fiskevand er måske mere følsomme for frie NH<sub>3</sub> og HNO<sub>2</sub> koncentrationer ud fra det faktum, at NOB er kendt for at kunne akklimatisere sig til nye højere NH<sub>3</sub> og HNO<sub>2</sub> koncentrationer (ved højere pH-værdier) (Anthonisen *et al.* 1976). NOB er generelt mere følsomme for miljøændringer end ammoniumoxiderende bakterier (AOB). NOB inhiberingen kunne derfor tænkes at ske som følge af pH ændringen ved flow 0,5 l/s (samt ved flow 1 l/s for forsøg B). En anden mulighed er, at de lave flowhastigheder giver mindre turbulens i filteret og dermed nedsat ilt- og substratgennemtrængning i biofilmen. Den høje ammoniumkoncentration ved de lave flow kræver yderligere mere ilt til omsætningen, end ved de lavere ammoniumkoncentrationer. NOB er kendt for at være mere følsom for lave iltkoncentrationer end AOB (Picioreanu *et al.* 1997, Zhang *et al.* 1995).

I figur 6-5 ses af ammoniumsensorregistreringerne ved flow 0,5 l/s at "steady state" ikke er indtruffet ved slutningen af forsøget ej heller efter 3 x opholdstid, 8 timer 40 min. Selvom hædningskoefficienten er klart aftagende, ser det heller ikke ud til at "steady state" fuldt ud er opnået i forsøget med 1 l/s.

Til figur 6-2 om pH i forsøg A skal tilføjes at inden forsøgsstart blev samme pH målt før og efter filtrene, dog for Bioblok lå de 0,08 og 0,07 enheder lavere efter filtrene for henholdsvis BB I og BB II. Når Moving Bed II på grafen ligger relativt højere end de andre skyldes det derfor at pH-loggerens indstilling er kalibreret ca. 0,1 pH-enhed for højt.

Moving bed filtrene er meget sammenlignelige de to forsøgsserier imellem med en omsætningskapacitet på knap 0,3 g/m<sup>2</sup>/d (tabel 6-3). Derimod ses en signifikant forbedring af Bioblok filtre fra under 0,5 g N/m<sup>2</sup>/d i forsøg A til ca. 0,7 g N/m<sup>2</sup>/d i forsøg B.

Der er ikke altid konsensus om at anvende omsætning pr. overfladeareal som sammenligningsparameter, eller/og overfladearealet kan fortolkes lidt forskelligt. Eksempelvis blev i et studie kun den indre overflade af plastelementerne i et moving bed filter regnet med som overflade, udfra det rationale at den ydre overflade ikke er en effektiv overflade, fordi overfladerne skraber mod hinanden i filteret og biofilmen derved falder af (Hem *et al.* 1994). Derfor er der i tabel 6-5 også angivet omsætningskapaciteter ukorrigerede for overfladeareal (g/døgn). Disse tal viser, at Moving Bed filtrene totalt rensede bedre i forsøg A end Bioblok filtrene (MB: 463 ± 34 g/d; BB: 389 ± 9 g/d \*). I forsøg B rensede Bioblokkene totalt derimod bedre end Moving Bed (MB: 439 ± 20 g/d; BB: 645 ± 76 g/d \*). I fem dage inden forsøg B blev opstartet, kørte filtrene med den høje ammoniumkoncentration (indløbskoncentration 6,3 ± 0,4 mg-N/l), som blev brugt til forsøget. Data kunne således tyde på, at Bioblok-filtre hurtigere omstiller sig til skiftende miljø end Moving bed filtre. Indløbskoncentrationen op til forsøg A var 2,9 ± 0,1 mg NH<sub>4</sub>-N/l.

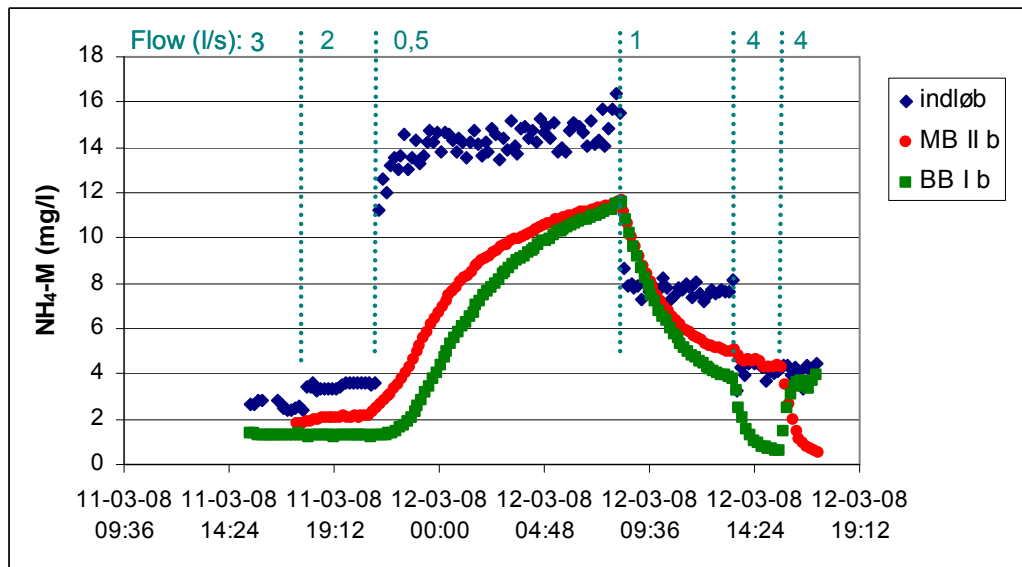
En lille vandstrøm fra BB II blev ledt fra filterindløbet efter vandret til ammoniumsensorregistrering i forsøg B. Denne "udenom-vandstrøm" blev målt til ca. 0,023 l/s, når flow til alle filtre var omkring 1,4 l/s. Det er muligt at dette udenomsflow blev større i forsøg 5 II, hvor flowet til filteret var 4 l/s. Dette kan muligvis bidrage til at forklare den noget højere omsætning (0,95 g N/m<sup>2</sup>/d) i BB II i forhold til BB I (0,73 g N/m<sup>2</sup>/d) ved 4 l/s.

For Moving Bed var iltniveauet målt i toppen af filtene i forsøg ved flow 4 l/s i forsøg B kun 6,7-6,8 mg/l (svarende til ca. 60 % iltmætning). Dette kan være

---

\* Gennemsnit udregnet for de 3 højeste flow /laveste opholdstider, men samme tendens er gældende for alle behandlinger

grunden til den lidt lavere omsætning målt her, og som betyder at omsætningen samlet set er lidt lavere for MB i forsøg B end A.



**Figur 6-5.** Ammoniumsensoreregistreringer i forsøg B (ukorrigerede).  
"Steady state" er ikke indtruffet efter flow 0,5 l/s, og 1 l/s for BB I, dvs. ikke vandrette linieførøb i enden af forsøgsperioden.

## Forsøg med effekt af iltniveau

For at teste iltkoncentrationens betydning for ammoniumomsætningen blev et lille delforsøg gennemført den 18.-19. marts 2008 med varierende iltmængder i Bioblokkiltrene.

Forsøgsbehandlingerne er vist i tabel 6-4.

**Tabel 6-4.** Forsøg med iltbegrænsning

Forsøgsnr.	Ilt mætning (%)*	NH <sub>4</sub> -N i indløb (mg/l)
1	81	5,45 ± 0,07
2	70	5,26 ± 0,03
3	63	5,34 ± 0,03
4	53	5,35 ± 0,06
5	45	5,35 ± 0,03
6	41	5,37 ± 0,07

\*Målt i toppen (svarende til afløb) af filteret.

Flowet gennem filtrene blev holdt konstant gennem forsøgsperioden, og målt til henholdsvis 1,99 l/s ± 0,007 og 2,02 ± 0,004 l/s for filter BB I og BB II. Ved hver behandling kørte filtrene i to timer (3 x opholdstid på 40 min) ved indstillingen til opnåelse af "steady state" inden 3 øjeblikksprøver blev udtaget med 10 min interval. Ilt, pH og temperatur logget under forsøgene ses i tabel 6-5a og b. Ammoniumkoncentrationen ind gennem forsøgsperioden blev målt til 5,35 ± 0,06 mg N/l.

**Tabel 6-5a.** Ilt målt i ind- og udløb fra Bioblok filtre, gennemsnit for måleperioden.

	Ilt (mg/l)						% iltmætning					
	Indløb	std	BB I	std	BB II	std	Indløb	std	BB I	std	BB II	std
forsøg 1	6,76	0,08	9,54	0,09	9,65	0,10	57,1	0,7	80,6	1,0	82,0	1,1
forsøg 2	6,72	0,04	8,26	0,03	8,20	0,03	57,4	0,3	70,6	0,3	70,3	0,5
forsøg 3*	6,64	0,03	7,32	0,02	7,20	0,05	57,0	0,2	62,9	0,1	62,2	0,5
forsøg 4	6,31	0,20	6,23	0,04	6,02	0,06	53,9	1,8	53,0	0,5	51,5	0,5
forsøg 5*	6,64	0,26	5,34	0,18	5,16	0,27	55,6	2,2	44,7	1,6	43,4	2,2
forsøg 6	6,53	0,09	4,96	0,21	4,66	0,15	55,2	0,7	41,9	1,7	39,5	1,3

\*)Loggedata for de første 40 min er frasortet.

**Tabel 6-5b.** Temperatur og pH målt i ind- og udløb, gennemsnit for måleperioden.

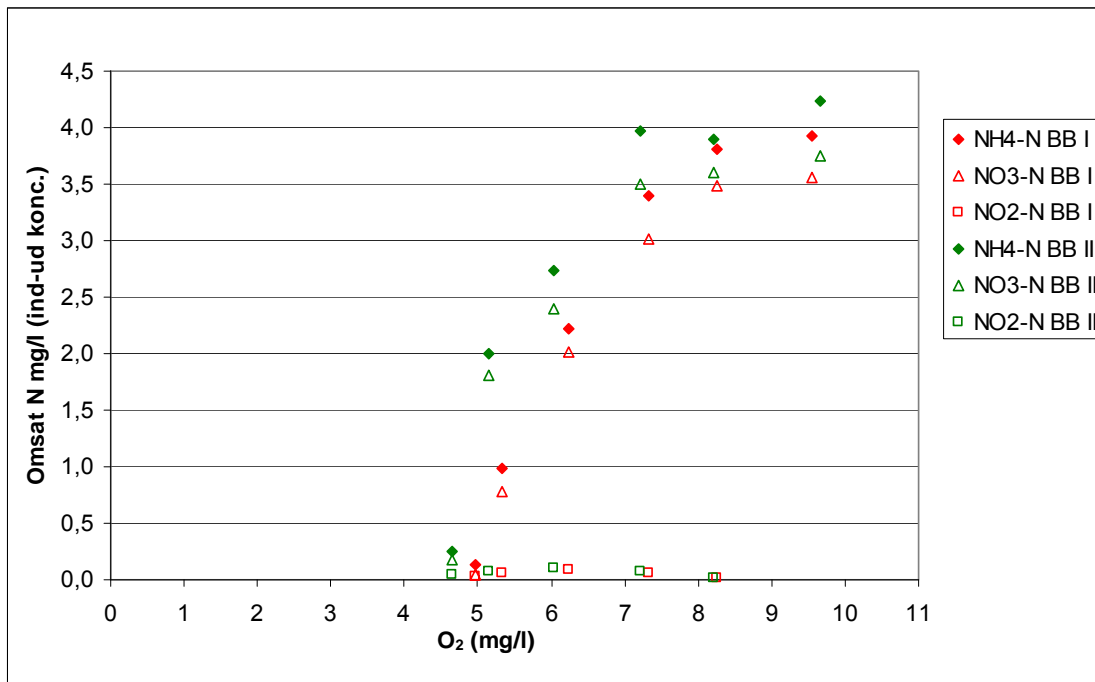
	Temperatur						pH					
	Indløb	std	BB I	Std	BB II	std	Indløb	std	BB I	std	BB II	std
forsøg 1	7,6	0,1	7,8	0,1	7,8	0,1	6,70	0,01	6,71	0,01	6,49	0,01
forsøg 2	8,0	0,1	8,2	0,1	8,2	0,1	6,68	0,00	6,63	0,01	6,42	0,01
forsøg 3	8,2	0,1	8,5	0,0	8,5	0,0	6,67	0,00	6,62	0,02	6,40	0,01
forsøg 4	8,1	0,1	8,1	0,1	8,2	0,1	6,66	0,01	6,67	0,01	6,44	0,01
forsøg 5	7,4	0,1	7,5	0,1	7,6	0,1	6,64	0,00	6,73	0,02	6,46	0,01
forsøg 6	7,7	0,1	7,9	0,1	7,9	0,1	6,63	0,00	6,79	0,01	6,56	0,03

## Resultater og diskussion af iltbegrænsningsforsøg

Forsøg 1, 5 og 6 blev udført om morgenen, hvilket gav en anelse lavere vandtemperatur (tabel 6-5b), men generelt var vandtemperaturen i filterene i forsøgsperioden  $8,0\text{ °C} \pm 0,3$ .

Der var ingen markante pH-ændringer. De relativt små pH-ændringer som blev målt, viste som forventet relativt højere pH ved lav omsætningshastighed.

Ammonium blev hovedsagligt omdannet til nitrat, og stort set ingen nitritophobning fandt sted (figur 6-6). Omsætningen var relativt ens de to filtre imellem, og gav den samme stigende betydning af iltindholdet for omsætningen. Det højeste iltindhold ( $9,6\text{ mg/l} \approx 81\%$  mætning) giver den højeste omsætning ( $0,41 \pm 0,02\text{ g/m}^2/\text{d}$ ) (figur 6-7). Ved iltniveauer under ca.  $7\text{ mg/l O}_2$  (svarende til ca.  $60\%$  iltmætning) falder omsætningsraten markant. Raten er ved ca.  $50\%$  iltmætning halveret i forhold til  $80\%$ . Forløbet er formodentligt ikke helt fladet ud, så hastigheden kan måske øges en anelse ved at øge iltindholdet yderligere.

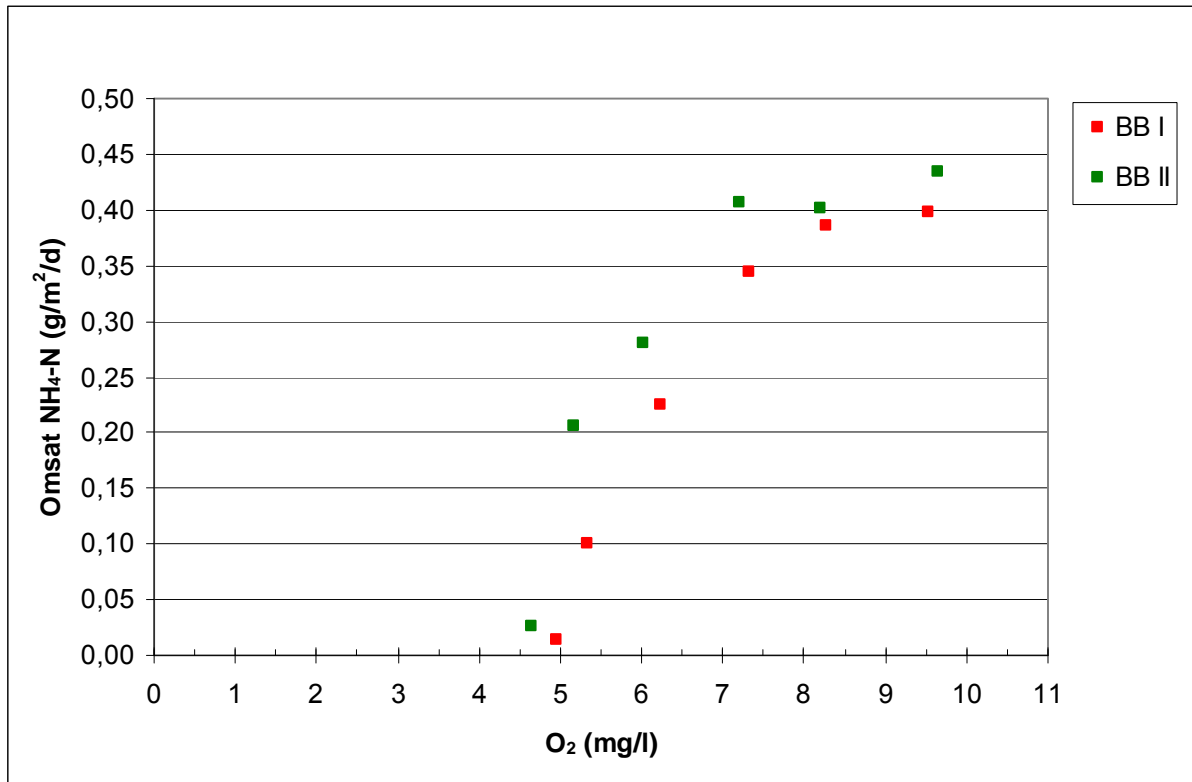


**Figur 6-6.** Omsætning af ammonium-, nitrit- og nitrat-N i Bioblok-filterene under iltbegrænsningsforsøg.

Ilt blev tilført filterene ved indblæsning af luft i bunden, og iltregistreringen skete med sensorer placeret i toppen af filterene. Dvs. den målte værdi må antages at være en minimumsværdi for filteret, og i praksis vil der være en vis gradient fra indblæsningsdyserne og til toppen af filtret. Størrelsen af denne gradient er dog ikke målt.

Endvidere skal det tilføjes, at en øget turbulenseffekt ved højere luftindblæsning (selvom vandflowet gennem filterene var ens forsøgene imellem) i teorien også kan

bidrage til øget omsætning, idet højere turbulens øger diffusionshastigheden i vandgrænselaget til biofilmen (Chen *et al.* 2006).



**Figur 6-7.** Iltindholdets betydning for den overfladespecifikke ammoniumomsætning i bioblok-filtre.

## Forsøg med effekt af substratniveau

For at teste effekten af substratkoncentrationen blev et ammoniumdoseringsforsøg udført den 17. marts 2008 på Bioblokkiltrene. Flowet var 2,0 l/s for begge filtre, og doseringspumpen blev varieret som vist i tabel 6-6. Med en opholdstid på 40 min, blev "steady state" forhold antaget efter 2 timer (analogt til iltbegrænsningsforsøget). Ammonium-N koncentrationen i doseringsvæsken var ca. 44 g/l.

**Tabel 6-6.** Forsøg med substratbegrænsning af ammonium-N i Bioblok-filtre.

Forsøgsnr.	Dosering (l/t)	Dosering <sup>1</sup> (mg/l)	Indløbskonc. <sup>2</sup>
A	2,5	+5,3	9,19
B	1	+2,1	4,35
C	0,5	+1,1	3,27
D	0,2	+0,4	2,91
E	-		2,44

<sup>1</sup>Teoretisk udregnet fra 44g N/l opløsning

<sup>2</sup>Udregnet som differens mellem Total-N og NO<sub>32</sub>-N

Desværre blev produktionsenhed 3 behandlet med formalin lige inden forsøgsstart, hvilket betød et formaldehydindhold i prøverne på max. 12,3 mg/l i starten af forsøget og min. 2,3 mg/l ved slutningen af forsøget. Da formalin interfererer med ammoniumanalysemetoden, blev ammonium-N udtrykt som differensen mellem total-N og nitrit+nitrat-N i stedet for ved bestemmelse efter DS224, med den usikkerhed at andre N-forbindelser (bl.a. organisk kvælstof) derved bliver regnet med som ammonium-N.

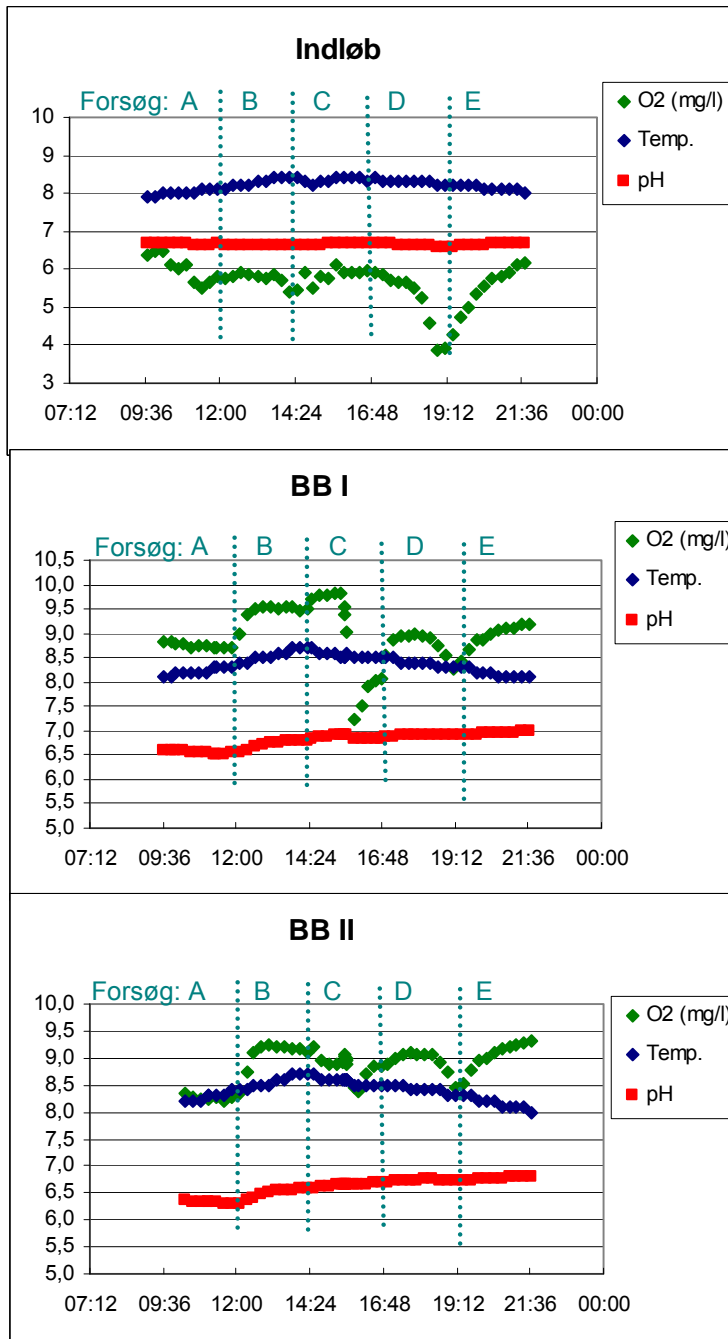
Ilt, pH og temperatur målt under forsøget ses i figur 6-8. For BB I var gennemsnitsindholdet af ilt 8,86 mg/l ± 0,34 (ca. 77 % iltmætning), pH 6,61±0,16 og temperaturen 8,4 °C. For BB II var det tilsvarende 8,95 ± 0,56 mg O<sub>2</sub>/l, pH 6,8 ± 0,15 og samme temperatur som i BB I.

### Resultater og diskussion af ammoniumbegrænsningsforsøg

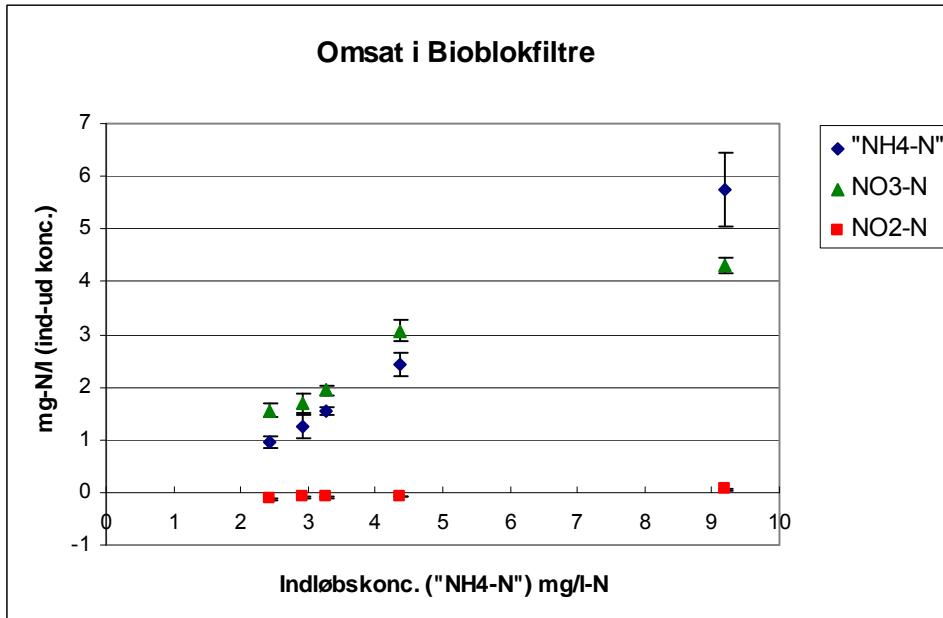
Beregnet omsat mængde ammonium og dannet nitrit og nitrat ses i figur 6-9. Det fremgår, at kun ved den høje dosering blev der dannet lidt nitrit (kun 0,1 mg N/l), hvorimod de øvrige behandlinger havde lavere nitritindhold efter filteret end før. Data antyder en lineær proportional stigning i ammonium-omsætningen op til over 4,35 mg/l NH<sub>4</sub>-N (figur 6-10). Nitrat og ammonium har divergerende tendenslinier med hensyn til den højeste ammoniumkoncentration (nitrat faldende omsætning, ammonium fortsat lineært proportionalt stigende). Da nitratdannelsen gennem næsten alle forsøg har afspejlet ammoniumomsætningen, og pga. problemet med formalininterferens og de usikkerheder dette medfører, er det mest nærliggende at betragte nitratforløbet som repræsentativt for sammenhængen mellem substrat og omsætning.



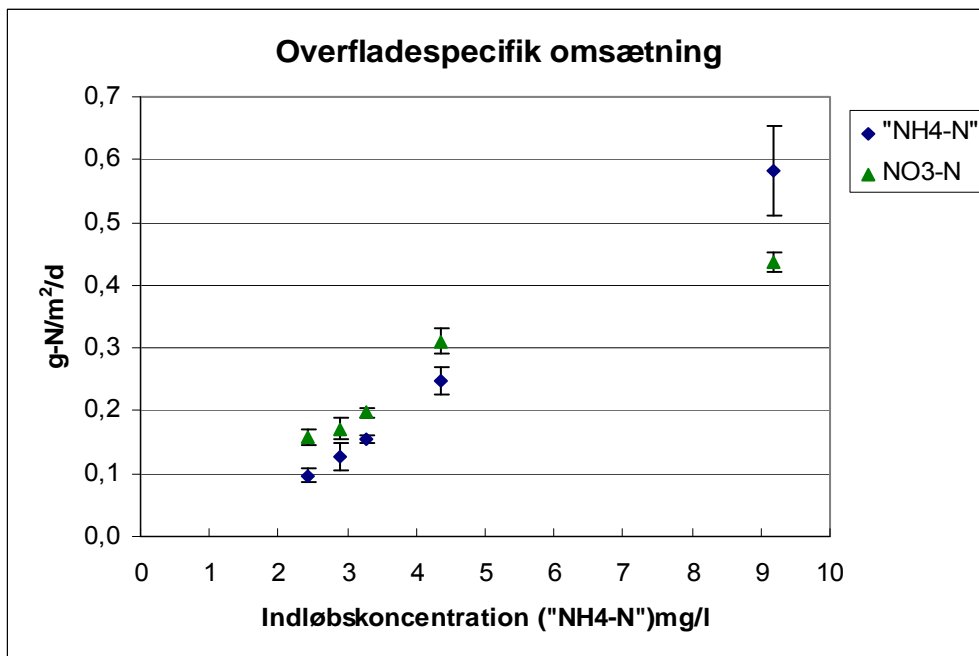
Der er tendens til, at den svage pH-stigning (figur 6-8) er korreleret til lavere ammoniumindhold og lavere omsætning. BB I er kortvarigt nede på 62 % iltmætning (kl.15.51), men der ses ingen tydeligt effekt af dette i data.



Figur 6-8. Ilt, pH og temperatur i substratbegrænsningsforsøg A til E (Bioblok-filtre).



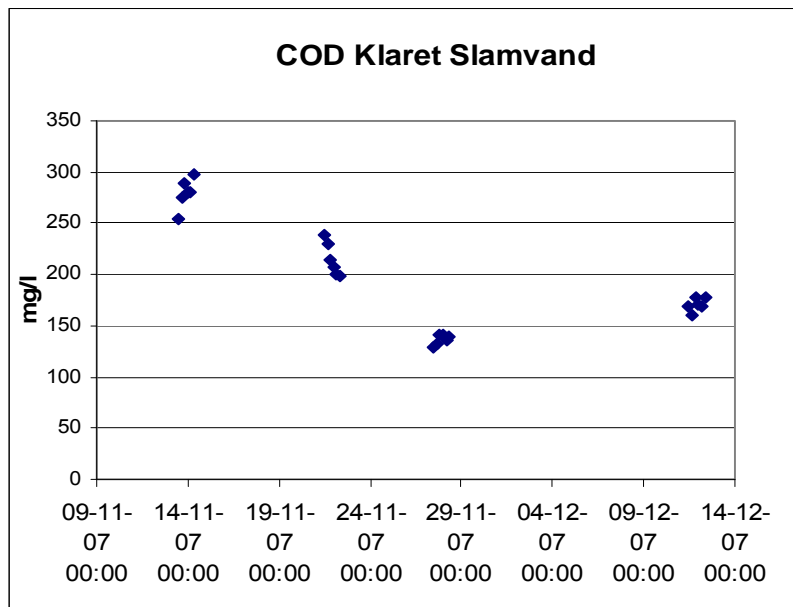
**Figur 6-9.** "Ammonium", nitrit og nitrat i bioblok-filtre under substratbegrænsningsforsøg.



**Figur 6-10.** Den overfladespecifikke omsætning i bioblok-filtre af "ammonium" og nitrat i substratbegrænsningsforsøg.

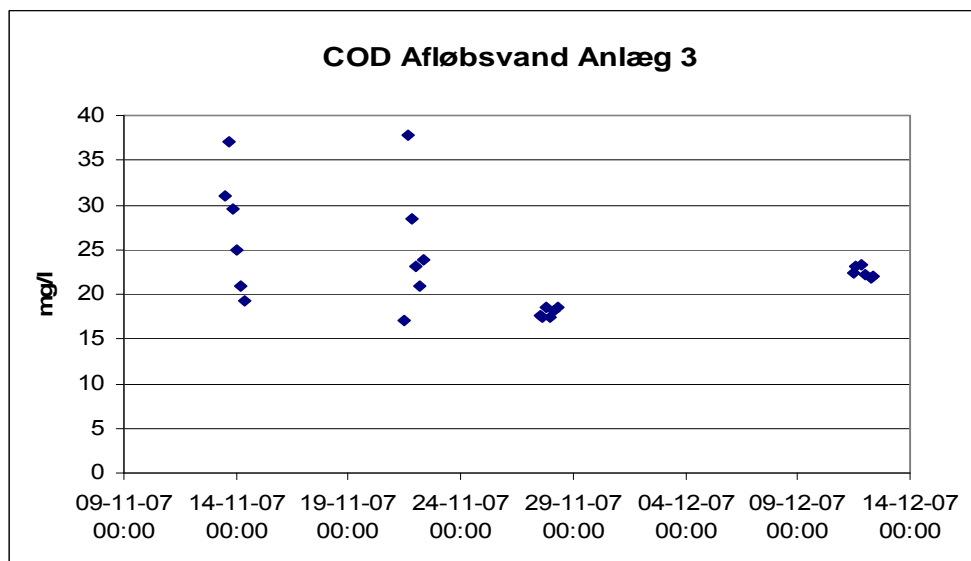
## 7. COD og BI<sub>5</sub>

Som forundersøgelse til denitrifikationsforsøg, blev COD indholdet målt i det klarede slamvand, som var tilkoblet forsøgsanlægget. COD niveauet lå på 130-300 mg/l (figur 7-1). Det ser således ud til, at der er rigeligt med organisk materiale til at drive denitrifikationen. Store svingninger i COD-indholdet og slamophobninger kan dog tænkes at give procesproblemer i praksis.



**Figur 7-1.** COD-indhold i klaret slamvand til forsøgsfiltre.

COD i anlægsvandet til forsøgsfiltrene lå i niveau 20-35 mg/l (Figur 7-2), og BI<sub>5</sub> var gennemsnitligt  $4,55 \pm 0,48$  mg/l (målt d. 12.12.07, d.21.02.08, og d.12.03.08, fordelt på 11 prøver) og dermed i gennemsnit under den anbefalede grænseværdi (Arvin & Beck 1998).



Figur 7-2. COD-indhold i afløbsvand fra produktionsenhed 3 til forsøgsfiltre.

## 8. Omsætning i biofilteret i produktionsenhed 3

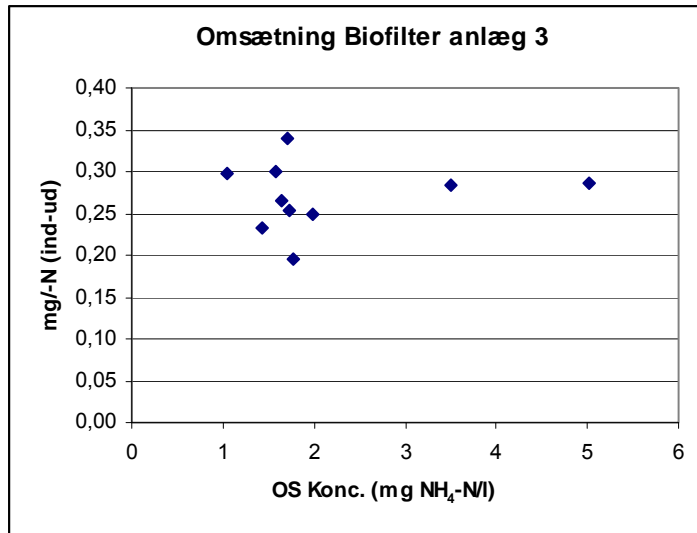
Under forsøgsgange på dambruget blev der også taget enkelte øjebliksprøver i produktionsenhed 3, opstrøms (OS) og nedstrøms (NS) biofilteret.

**Tabel 8-1.** Ammonium-N koncentration før og efter biofilteret i produktionsanlæg 3

	OS Biofilter	Indløb (NS biofilter)	Konc.forskel
09-01-2008 10:50	1,44	1,20	0,23
09-01-2008 18:35	1,72	1,47	0,25
16-01-2008 10:40	1,58	1,28	0,30
16-01-2008 18:20	1,71	1,37	0,34
23-01-2008 11:00	3,51	3,22	0,28
30-01-2008 10:15	1,04	0,74	0,30
06-02-2008 10:30	1,64	1,38	0,27
13-02-2008 10:30	1,98	1,73	0,25
20-02-2008 11:00	1,77	1,57	0,20
27-02-2008 11:25	5,02	4,73	0,29
Gns	2,14	1,87	0,27
Stdafv	1,20	1,19	0,04

På baggrund af disse prøver (tabel 8-1) kan anslås at biofilteret i produktionsenhed 3 omsætter ca. 0,10 g N/m<sup>2</sup>/d, og det ser ikke ud til at omsætningen er substratbegrænset (figur 8-1), idet der ikke ses tendens til stigende omsætning med stigende ammoniumkoncentration. Denne væsentligt lavere omsætning i forhold til pilotbiofiltrene kan naturligvis delvist skyldes forskel i ammoniumniveauer, hvor ammonium blev suppleret til pilotfiltrene. Men andre faktorer kan have mere afgørende

betydning, som vil blive yderligere berørt i diskussionsafsnittet (afsnit 9 – Diskussion og sammenfatning).



**Figur 8-1.** Koncentrationsforskel over biofilteret (OS-NS) i produktionsanlæg 3, som funktion af ammoniumkoncentrationen.

Den anslåede, overfladespecifikke omsætning i anlæg 3 stemmer meget godt overens med den, som kan udregnes på baggrund af modeldambrugsprojektets 2. årsrapport for Kongeåens Dambrug (Svendsen *et al.* 2008 b) på 0,09 g/m<sup>2</sup>/d.<sup>4</sup>

## 9. Rentabilitet af kvælstof-efterrensning på Modeldambrug

### Nitrifikationsanlæg

Ud fra driftserfaringerne på Kongeåens Dambrug kan belastningen af et filter til efternitrificering sættes til ca. 100 l/sek. med 3 mg/l ammonium fra produktions- og slambehandlingsanlæg. Dette giver en døgnbelastning på 25,9 kg ammonium. Forudsættes en ammoniumreduktion på 80 %, svarende til en afløbskoncentration på 0,6 mg/l skal filteret omsætte 20,7 kg ammonium pr. døgn.

Med udgangspunkt i rapportens omsætningsrater på henholdsvis 0,45 g/m<sup>2</sup> pr. døgn for Bioblok filteret og 0,23 g/m<sup>2</sup> pr. døgn for moving bed filteret ved en ammoniumkoncentration på ca. 3 mg/l er der dimensioneret to konkrete filtre med et specifikt overfladeareal på henholdsvis 46.000 m<sup>2</sup> for Bioblokkfilteret og 90.000 m<sup>2</sup> for moving bed filteret.

<sup>4</sup> 17729 kg ammonium-N fjernet, 365 dage, 3 anlæg á 172000m<sup>2</sup> overflade.

Moving bed filteret består af et bassin med en vanddybde på 2,5 m, en bredde på 12 m og en længde på 7,5 m. Bassinet er delt op i 3 sektioner à 2,5 meters længde med skillevægge og topriste for vandgennemgang. Hver sektion beluftes ved udløbsristen med  $30 \text{ m}^3$  luft pr. meter. Moving bed filteret har en fyldningsgrad på 50 % små bioelementer. Herved bliver volumen på  $225 \text{ m}^3$ .

Baseret på erfaringsværdier skal der bruges ca.  $1.200 \text{ m}^3$  luft/h til drift af filteret. Trykket luften skal leveres ved er dels vanddybden på 2,5 m og tab i rør, ventiler og diffusorer. Dette tab ligger erfaringsvist på ca. 0,3 m vandsøjle ved en hensigtsmæssig dimensionering af anlæggene. I alt bliver tryktabet på 2,8 m vandsøjle. Effektforbruget bliver på ca. 12,6 kW.

Bioblokfilteret er bygget med en fyldningshøjde på 2,2 m, svarende til højden af 4 standardbioblokke. Med denne fyldningshøjde bliver filterets areal på  $104,5 \text{ m}^2$ . Hertil kommer et frirum på 0,25 m i bunden til tilledning af vand og placering af beluftningsudstyr. Herudover er der et frirum på 0,25 m over fyldningen til afledning af vand. Dette giver et bassinvolumen på ca.  $280 \text{ m}^3$ , hvor ca. 82 % af voluminet optages af filterfyldningen. I bioblokfilteret er indblæsningsdybden 2,7 m og øvrige trykfald er igen sat til 0,3 m vandsøjle. Dette giver et modtryk på 3 m vandsøjle. Beluftningen er sat til  $10 \text{ m}^3/\text{m}^2$  ud fra erfaringsværdier. Effektforbruget bliver her på ca. 11,8 kW.

Ved beregning af energiforbruget til beluftning er der taget udgangspunkt i fabriksspecifikationer, men disse er korrigeret i forhold til målte effektforbrug i praksis. Angivelsen kW går på blæsernes optagne effekt her og nu. Effektforbruget over tid måles i kWh.

Da der ikke er tale om absolutte værdier for de to anlægs energiforbrug, vælges det at sætte dem til samme energiforbrug. Dels ligger de beregningsmæssigt meget tæt på hinanden, og dels er der ikke tale om et i alle detaljer færdigt projekt for filtrene, men kun de overordnede rammer.

Filtrene kan kort skitseres som følger:

Biofiltermateriale Bioblok  $200 \text{ m}^2/\text{m}^3 = 230 \text{ m}^3$  á  $1.300 \text{ kr./m}^3$   
Biofiltermateriale moving bed  $(800 \text{ m}^2/\text{m}^3) = 112,5 \text{ m}^3$  á  $2.300 \text{ kr./m}^3$

Volumen af filterbassin Bioblok  $280 \text{ m}^3$   
Volumen af filterbassin moving bed  $225 \text{ m}^3$

Beluftning af filtre  $1.200 \text{ m}^3/\text{h}$

Indblæsningstryk 2,8 m vandsøjle

Effektforbrug 12,6 kW

På dette grundlag skønnes følgende etableringsomkostninger til et filter indrettet med Bioblokke og et filter udført som moving bed:

#### Bioblok filter

Jord og betonarbejde 560.000 kr.  
Filterfyldning 300.000 Kr.  
Smedearbejde/maskiner 280.000 Kr.  
I alt 1.140.000 Kr.

#### Moving Bed filter

Jord og betonarbejde 450.000 kr.  
Filterfyldning 260.000 Kr.  
Smedearbejde/maskiner 225.000 kr.  
I alt 935.000 kr.

Omkostningerne til drift kan opgøres som følger:

Årligt elforbrug 110.000 kWh á 0,7 kr./kWh  $\approx$  77.000 Kr.

Årlig afskrivning og forrentning Bioblok filter (16 %)  $\approx$  182.000 kr.  
Årlig afskrivning og forrentning moving bed filter (16 %)  $\approx$  150.000 kr.

Tilsyn og pasning Bioblok filter 150 timer/år á 175 kr.  $\approx$  27.000 kr.  
Tilsyn og pasning moving bed filter 100 timer/år á 175 kr.  $\approx$  18.000 kr.

Ud fra ovennævnte bliver de samlede årlige omkostninger for drift af et Bioblok filter ca. 286.000 kr. De samlede årlige omkostninger for drift af et moving bed filter udgør ca. 245.000 kr.

Med en årlig produktion på 1.000 ton fisk bliver omkostningen pr. kg produceret fisk på 24,5 – 28,6 øre/kg ved de to filtertyper. Da de væsentligste omkostninger ved filtrenes etablering og drift er proportional med filterstørrelsen, vil det anførte omkostningsniveau stort set være generelt for alle størrelser dambrug med samme udledningsprofil som Kongeåens Dambrug.

Forskellen i de to filtertypers drift er, at Bioblok filteret skal returskylles (dog ikke særligt ofte grundet den lave organiske belastning). Dette er ikke tilfældet for moving bed filteret. Driftsudgifterne er i al væsentlighed begrænset til manuel pasning og elforbruget.

Med udgangspunkt i de påviste omsætningsrater på henholdsvis 0,45 g/m<sup>2</sup> pr. døgn for Bioblok filteret og 0,23 g/m<sup>2</sup> pr. døgn for moving bed filteret ved en ammoniumkoncentration på ca. 3 mg/l, bliver moving bed filteret mindst, trods en lavere omsætning og en dårligere fyldningsgrad for filtermediet, da det specifikke overfladeareal i filtermaterialet er fire gange større end det angivne for Bioblok filteret.

Tryktabet over begge filtertyper er marginalt og helt uden betydning ved det forventede flow gennem filtrene. Den tilførte effekt tjener udelukkende til beluftning af Bioblok filteret og til beluftning og rotation af filterfyldningen i moving bed filteret.

Prisforskellen på de to filtre ligger dels i den aktuelle størrelse og det anvendte biomedie, men også i det nødvendige tilbehør. Beluftningen af moving bed filtrene er mere enkel end beluftningen af Bioblok filteret. Moving bed filteret kræver tre diffusorer á 12 m og tre lette skillevægge med toprist, medens hele bunden i Bioblok filteret skal være dækket af diffusorrør med ca. 30 cm mellemrum. Herudover skal der laves et skyllevandsudtag i Bioblok filteret.

Omkostningerne til filtrenes etablering og drift ligger på et niveau, der med de nugældende priser på fisk og foder kan være afskrækkende. Hvis det er muligt, kan en optimering af nitrifikationen i eksisterende biofiltre i produktionsanlæggene være en bedre investering, der samtidig kommer produktionen til gode.

Er muligheden for at forbedre nitrifikationen i eksisterende filtre ikke tilstede, og der samtidig er udsigt til en produktionsbegrænsning som følge af en for høj ammoniumudledning, må rentabiliteten af en supplerende ammoniumrensning vurderes ud fra de konkrete forhold. På større anlæg må denne vurdering ofte forventes at falde ud til fordel for etablering af supplerende rensning.

### **Denitrifikationsanlæg**

På grundlag af nærværende data er det ikke muligt at vurdere omkostningerne ved etablering og drift af et denitrifikationsanlæg. Spildevandslitteraturen giver grund til at forvente nogenlunde samme omkostninger, som angivet for nitrifikationsanlæg, ved etablering og drift af denitrifikationsanlæg. Holder dette stik, må der forudses en god rentabilitet i et sådant anlæg, idet en reduktion af kvælstofudledningen ofte vil indebære mulighed for en øgning af foderforbruget. Anlæggenes produktion er grundlæggende begrænset af totalkvælstofudledningen og nitrificeringen alene fjerner intet kvælstof, men er dog en forudsætning for at bringe kvælstoffet over på nitratform. Med en given specifik kvælstofudledning er foderforbruget normalt bestemt af dette. Er der plads inden for udledningen af fosfor og BI5 kan f.eks. en halvering af den specifikke kvælstofudledning give en fordobling af foderforbruget.

Stordriftsfordelene vil her med stor sandsynlighed mere end opveje de øgede omkostninger til rensning.

Her kommer overholdelse af udlederkravene for ammonium også ind i billedet, hvilket nemt kan give anledning til, at et denitrifikationsanlæg må kobles sammen med et nitrifikationsanlæg.



## 10. Diskussion og sammenfatning

Det må anses som en fordel at opdele vandbehandling og fiskeopdræt i separate systemer, hvis man ønsker at optimere begge dele samtidigt. Eksempelvis bør vandets indhold af organisk stof være så lavt som muligt i det procestrin hvor nitrifikation ønskes, for at nedsætte nitrifikanternes konkurrence om plads og ilt fra heterotrofe bakterier. I modeldambrugsprojektets 2. års rapport for Kongeåens Dambrug er  $BI_5$  opstrøms biofilteret 22 % højere end nedstrøms. Et  $BI_5$ -niveau under 5 mg/l er anbefalet for at drive en effektiv nitrifikation (ved iltniveau over 6 mg/l) (Arvin og Beck, 1998), hvilket er tilfældet nedstrøms biofilteret (afsnit 7 - COD og  $BI_5$ ). Dog kan den bedre renseevne opnået i pilotanlægget i forhold til produktionsenhedens biofilter ikke tilskrives forskel i organisk stof alene. Hydraulik, iltniveau og drift er også væsentlige faktorer for omsætningsprocesserne i filteret, ligesom ammoniumkoncentrationsniveauet er afgørende.

### Driftsforsøg

De indledende døgnprøveanalyser viste ikke et klart, bestemt mønster eller en stor døgnvariation i anlægsvandets ammoniumindhold, og derfor blev prøveindsamlingen spredt over 3 døgn for at få et mere dækkende billede over et større tidsrum.

Resultaterne for driftforsøgene viser (tabel 5-2) at ammoniumomsætningen var klart substratbegrænset, i modsætning til forholdene i det "primære", interne biofilter i produktionsenhed 3 (figur 8-1).

Ved driftsforsøg med ammoniumtilsætning viser de første par uger en overfladespecifik omsætning på 0,23 og 0,45 g  $NH_4-N$  / $m^2/d$  for henholdsvis Moving bed og Bioblokkfiltre. I slutningen af projektperioden er omsætningen steget til henholdsvis 0,30 og 0,71 g  $NH_4-N$  / $m^2/d$  for Moving bed og Bioblokkfiltre. Det ser således ud til at nitrifikanterne i filtrene øges i antal eller på anden vis optimeres til forholdene. Denne omsætningsøgning over tid genfindes også ved opholdstidsforsøgene for Bioblok-filtrene.

Ammoniumsensorerne (med K-kompensation) viste sig generelt velegnet til overvågning af ammoniumudviklingen, men til angivelse af præcise mængder kræves en omhyggelig kalibrering, som kan være vanskelig at foretage under praktiske feltforhold.

### Parameterafhængighedsforsøg

#### Opholdstid

I opholdstidsforsøgene var opholdstiden konfunderet med ammoniumindløbskoncentrationen på den måde forsøgene var sat op (dvs. højere koncentration ved længere opholdstid). Dette skabte nogle problemer

ved de høje opholdstider (173-76 min.), hvor omsætningshastigheden ikke helt kom op på niveau, som for de øvrige opholdstider (tabel 6-3) blandt andet p.g.a. alkalinitetsbegrænsning. Dog var denne sammenkædning af koncentration og opholdstid nødvendig for ikke at få koncentrationsbegrænset omsætningen ved høje opholdstider. De nitritoxiderende bakterier blev ved høje opholdstider hæmmet, givetvis grundet iltmangel inde i biofilmen eller grundet en pH effekt. Da NOB har pH optimum helt ned til 6,5 (Siegrist og Gujer 1987) er iltmangel formodentligt hovedårsagen. Medvirkende årsag til den lavere omsætningshastighed ved lange opholdstider kan dog også tænkes at være langsommere diffusion over vandgrænselaget i biofilmen grundet for lav turbulens effekt. Den maksimale omsætningshastighed blev fundet ved 20-40 minutters opholdstid til 0,3 g NH<sub>4</sub>-N /m<sup>2</sup>/d og 0,7 g NH<sub>4</sub>-N /m<sup>2</sup>/d for henholdsvis Moving bed og Bioblok filtre, samstemmende med resultaterne af driftsforsøgene med ammoniumtilsætning.

### **Iltniveau**

I forsøget med iltbegrænsning i bioblok-filtre fandtes en klar sammenhæng (figur 6-7) med kraftigt faldende omsætningshastighed ved 60 % iltmætning og derunder. Dermed er årsagen til den lavere omsætning for moving bed filtre ved flow 4 l/s i forsøg B forklaret i forhold til forsøg A, da iltmætningen i B var lige under 60 % mens den i A var omkring 80 %.

Iltbegrænsningsforsøget blev kun udført for Bioblok-filtre, men da nogle argumenterer for at Moving bed filtre er mere følsomme for variationer i iltmætnings-niveau end fastmedie filtre (Hem *et al.* 1994), er det nærliggende at antage, at iltbegrænsningsforsøgets resultater også er gældende for moving bed-filtre.

For recirkuleret fiskeopdræt skal iltkoncentrationen i en nitrificerende biofilm ikke komme under 2,3 mg/l (Chen *et al.* 2006). Ildiffusion i biofilm er naturligvis meget anlægsspecifikt, afhængigt af turbulens, organisk stof niveau, pH, temperatur, biofilmtykkelse- og udformning, biofiltermateriale- og indretningen m.v. I et studie af Zhang *et al.* 1995, var iltkoncentrationen halvvejs i biofilmen under 0,5 mg/l ved en iltkoncentration i vandet på 9 mg/l. I teorien er ilt begrænsende når iltkoncentrationen er mindre end 3,3 x ammonium-N koncentrationen. Grænsen for, hvornår nitrifikationsprocessen i et biofilter går fra at være ammoniumbegrænset til iltbegrænset (under forudsætning af ikke at være alkalinitetsbegrænset) er målt til 2,5 (Gonenc og Harremoes 1985) og 1,5 – 2 (Nogueira *et al.* 1998) g O<sub>2</sub> / g NH<sub>4</sub>-N.

### **Substratniveau**

Desværre var det ikke muligt at analysere for ammonium i doseringsforsøget pga. formalininterferens (afsnit 6 – Forsøg med ammoniumbegrænsning). Men da alle øvrige forsøg har vist god overensstemmelse mellem ammoniumomdannelse til nitrat, giver nitratdannelsestakten en god indikation for ammoniumbegrænsningen i forsøget (figur 6-10). Data fra iltbegrænsningsforsøget (med 63 % iltmætning) giver ratio 1,4 g O<sub>2</sub> /g NH<sub>4</sub>-N som transitionsforhold. Med et gennemsnitligt iltindhold på 8,9 mg/l (77 %

iltmætning) i substratbegrænsningsforsøget, vil ilt i stedet for ammonium blive begrænsende for omsætningen omkring 6,5 mg NH<sub>4</sub>-N/l, udregnet med 1,4 ratio, hvilket stemmer udmærket overens med nitrat forløbet i figur 6-9, om end data grundlaget er yderst spinkelt. Det stemmer også godt overens med fastmedie filtrene i driftsforsøgene (figur 5-6a). Den maksimale nitratdannelse ved højeste ammoniumkoncentration (dvs. ikke substratbegrænset) (figur 6-9) svarer også udmærket til omsætningen målt i iltbegrænsningsforsøget ved 81% iltmætning (figur 6-6).

Opholdstiden i ilt- og substratbegrænsningsforsøgene var 40 min. I opholdstidsforsøget (afsnit 6 – Undersøgelse af parameterafhængighed – Forsøg med effekt af opholdstid) havde forsøg nr. 3 en opholdstid på ca. 40 min, men data herfra (tabel 6-3) tyder ikke på at ammoniumkoncentrationerne 4,1-4,7 mg-N/l i disse forsøg var substratbegrænset.

For at kunne lave mere præcise beregninger over substrat -og iltbegrænsningsforhold, ville det være nødvendigt med flere målepunkter.

Årsagen til, at omsætningsraten kun er 0,4 g N/m<sup>2</sup>/d i ilt- og substratbegrænsningsforsøgene i forhold til de 0,7 g N/m<sup>2</sup>/d i opholdstids- og driftsforsøg kan tænkes at være formalinbehandlingen foretaget (d.17.03.08) lige inden substratbegrænsningsforsøgene. Tidligere formalinbehandlinger af produktionsenhed 3 blev foretaget tre måneder tidligere (31.12.07), hvilket betyder, at forsøgsfiltrene ikke var tilvænnet formalin overhovedet. COD og BI<sub>5</sub> analyser af behandlingerne i parameterafhængighedsforsøgene afveg ikke fra områderne fundet i driftsforsøgene (i afsnit 7 – COD og BI<sub>5</sub>).

### **Ammoniumtilsætning**

Det kan diskuteres om driftsforsøgene med tilsætning af ammonium giver et bedre rensresultat end naturligt højt ammonium, idet den tilsvarende opløste organiske stofmængde ikke er til stede. Dette var imidlertid nødvendigt for projektets gennemførelse, da de høje ammoniumkoncentrationer vi var interesserede i at undersøge ikke naturligt var til stede i produktionsenhed 3 på den årstid, som projektet blev gennemført. Dertil kommer at nitrifikationsdelen alligevel var 'afkoblet' recirkuleringen i fiskeproduktionsenheden, da idéen med projektet var at undersøge effekten af en ('afkoblet') efterrensenhed.

### **Sammenligning af filtertyper**

De to forskellige typer af filtre udviste meget ens omsætningskapaciteter, hvis der ikke korrigeredes for medieoverfladeareal. Ligeledes var der heller ingen filtertype-specifik forskel på opstartsfasens forløb for filtrene. Dog øgede fastmedie filtrene deres omsætningskapacitet målt i g/døgn til niveau over moving bed filtre i slutningen af måleperioden. Det kan således se ud til, at fastmedie filtret er mere fleksibelt, eller giver bedre mulighed for ændringer i biofilmen end moving bed filtre gør. Omvendt kan moving bed filtrenes stabilitet også blive anset som en fordel i nogle sammenhænge. På

grund af moving bed filtrenes konstant bevægelige filterenheder, kan det yderligere tænkes at være mindre følsomt for angreb ("græsning") af protozoer på biofilmen. Dette problem eller fænomen blev dog ikke observeret i nærværende projekt.

Hem *et al.* 1994 beskriver at moving bed filtre er mere følsomme for variationer i iltkoncentrationer end fastmedie filtre, og derfor bør moving bed filtre drives ved højere iltniveauer. Dette er ikke undersøgt i vore driftsforsøg.

### **Denitrifikationsforundersøgelser**

COD-indholdet i det klarede slamvand ser ud til at kunne tilpasses denitrifikation af nitrat i afløbsvand fra anlægget til COD/nitrat-N forhold 3-6. Det er intentionen at afprøve denitrifikation i pilotfiltrene i et efterfølgende projekt.

Det var ydermere interessant, at nitrit: ammoniumindholdet ved den højeste opholdstid nærmede sig 1:1, et forhold som er optimalt for anammox-processen (anaerobisk ammoniumoxidation), hvorved ammonium og nitrit bliver til frit kvælstof.

### **Konklusion**

Pilotfiltrene udviste stabile renseevner efter opstartsfasen, som var substrat-, alkalitets- eller iltbegrænset alt efter forholdene.

I starten af driftsfasen blev ammoniumomsætninger på 0,2 g N/m<sup>2</sup>/d (ca. 280 g N/d/filter) for moving bed og 0,4 g N/m<sup>2</sup>/d (ca. 325 g N/d/filter) for fastmedie Bioblok filtre målt ved indløbskoncentration på 4,1 ± 0,6 mg NH<sub>4</sub>-N/l, ca. 8 °C og ca. 10 mg O<sub>2</sub>/l. I modsætning til dambrugets eget interne biofilter, som kun omsatte ca. 0,1 g N/m<sup>2</sup>/d, var pilotfiltrene klart substratbegrænset. I driftsforsøg med ammoniumtilsætning øgedes omsætningskapaciteterne ved tilvæning til højt ammonium-niveau (6,3 ± 0,4 mg NH<sub>4</sub>-N/l) til 0,3 g N/m<sup>2</sup>/d (515 g N/d/filter) og 0,7 g N/m<sup>2</sup>/d (595 g N/filter) for henholdsvis moving bed og fastmedie filtre (ca. 8° C og iltniveau over 8 mg/l).

Fastmedie (Bioblok) filtre udviste således klart den højeste overfladespecifikke omsætning, mens den ikke medieoverfladekorrigerede omsætning var meget ens de to filtertyper imellem.

Det er oplagt, at det interne biofilter i dambruget kan optimeres yderligere for at opnå højere ammonium-omsætning (eksempelvis ved at øge iltindholdet tilsvarende ammoniumindholdet, eller nedbringe belastningen med organisk stof, samt driftsoptimering og hydraulisk optimering af filteret). Hvorvidt optimeringsomkostningerne bedre gives ud ved at installere et efterrensningsanlæg, som kan optimeres med specifikt henblik på kvælstofomsætning, må bero på de konkrete forhold på det enkelte dambrug.

Resultaterne fra dette projekt peger på, at efterrensning er en praktisk mulig løsning til nedbringelse af ammoniumindholdet i udløbsvandet for dambrug, som måtte have vedvarende problemer med højt ammoniumindhold. Der foreligger ikke klart fagligt belæg for at anbefale moving bed frem for fastmedie filter, om end der synes at være tendens til at fastmediefilteret var mere fleksibelt m.h.t. tilvænning til højere ammoniumkoncentrationer.

## 11. Litteraturliste

- Anthonisen, A.C., Loehr, R.C., Prakasam, T.B.S., Srinath, E.G., 1976. Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid. *Journal of Water Pollution Control Federation*, 48 (5), 835-852.
- Arvin, E og Beck, P. 1998. Fish production in aqua-cultures with water recirculation. The Technical University of Denmark, Department of Environmental Science and Engineering. Lecture notes.
- Chen, S., Ling, J., Blancheton, J.-P., 2006. Nitrification kinetics of biofilm as affected by water quality factors. *Aquacultural Engineering*, 34, 179-197.
- Ganigué, R., López, H., Balaguer, M.D., Colprim, J. 2007. Partial ammonium oxidation to nitrite of high ammonium content urban landfill leachates. *Water Research*, 41, 3317-3326.
- Gonenc, i.E., Harremöes, P., 1985. Nitrification in rotating disc systems. I: criteria for transition from oxygen to ammonia rate limitation. *Water Research*, 19, 1119-1127.
- 'Handlingsplan for dansk fiskeri og akvakultur', [www.fiskeriudvikling.dk](http://www.fiskeriudvikling.dk)
- Hem, L.J., Rusten, B., Ødegaard, H., 1994. Nitrification in a moving bed biofilm reactor. *Water Research*. 28 (6), 1425-1433.
- Henze, M., Harremöes, P., la Cour Jensen, J., Arvin, E., 2006. Teoretisk Spildevandsrensning – biologiske og kemiske processer. Polyteknisk forlag, Lyngby, Danmark. 431 s.
- Nogueira, R., Lazarova, V., Manem, J., Melo, L.F. 1998. Influence of dissolved oxygen on the nitrification kinetics in a circulating bed biofilm reactor. *Bioprocess Engineering*, 19, 441-449.
- Pambrun, V., Paul, E., Spérandio, M., 2008. Control and modelling of partial nitrification of effluents with high ammonia concentrations in sequencing batch reactor. *Chemical Engineering and Processing*, 47, 323-329.
- Pedersen, P.B., Grønborg, O., og Svendsen, L.M. 2003. Modeldambrug Specifikationer og godkendelseskrav. Rapport fra faglig arbejdsgruppe. Arbejdsrapport fra DMU, nr. 183 2003.
- Picioreanu, C., Loosdrecht, M.C.M., Heijnen, J.J., 1997. Modeling the effect of oxygen concentration on nitrite accumulation in a biofilm airlift suspension reactor. *Water Science and Technology*, 36, 147-156.

Siegrist, H., Gujer, W., 1987. Demonstration of mass transfer and pH effects in a nitrifying biofilm. *Water Research*, 21 (12), 1481-1487.

Svendsen, L.S., Sortkjær, O., Ovesen, N.B., Skriver, J., Larsen, S.E., Boutrup, S., Pedersen, P.B., Rasmussen, R.S., Dalsgaard, A.J.T., Suhr, K. 2008 a. Modeldambrug. Faglig slutrapport for "Måle- og dokumentationsprojekt for modeldambrug. Juli 2008". DTU-AQUA nr. 193-08

Svendsen, L.S., Sortkjær, O., Ovesen, N.B., Skriver, J., Larsen, S.E., Pedersen, P.B., Rasmussen, R.S., Dalsgaard, A.J.T. 2008 b. Kongeåens Dambrug – et modeldambrug under forsøgsordningen. Statusrapport for 2. måleår af monitoringsprojektet med væsentlige resultater fra første måleår. DTU Aqua-rapport nr. 182-08.

Thomsen, H.A., Pedersen, P.B., Pedersen, L.F. 2005. Danske dambrug ved en skillevej. *Fisk og Hav*, 58, 4-17.

Timmons, M.B., Ebeling, J.M., Wheaton, F.W., Summerfelt, S.T., Vinci, B.J., 2002. *Recirculating Aquaculture Systems*, 2<sup>nd</sup> Edition, Cayuga Aqua Ventures, Ithaca, NT, USA. 769 pp.

Zhang, T.C., Fu, Y.C., Bishop, P.L., 1995. Competition for substrate and space in biofilms. *Water Environment Research*, 67, 992-1003.

12. Bilag til afsnit 6 "Forsøg med effekt af opholdstid"

Tabel 6-A1. Omsætning af ammonium til nitrit og nitrat i forsøg A.

MB: Moving bed filtre. BB: Bioblok-filtre. n=5

Forsøgsnr.1		Indløb	stdafv.	MB I	stdafv.	MB II	stdafv.	BB I	stdafv.	BB II	stdafv.
<b>NH4-N</b>	Konc, mg/L-N	5,97	0,10	1,54	0,03	1,46	0,01	1,70	0,04	1,68	0,02
	Omsat (ind-ud)			4,43	0,13	4,52	0,11	4,28	0,14	4,29	0,12
<b>NO3-N</b>	Konc, mg/L-N	13,08	0,05	17,04	0,10	17,16	0,10	16,94	0,10	16,87	0,05
	Dannet (ud-ind)			3,96	0,15	4,07	0,15	3,86	0,15	3,79	0,10
<b>NO2-N</b>	Konc, mg/L-N	0,220	0,010	0,201	0,006	0,222	0,001	0,234	0,005	0,207	0,001
	Dannet (ud-ind)			-0,019	0,016	0,002	0,010	0,014	0,015	-0,013	0,011
Forsøgsnr.2		Indløb	stdafv.	MB I	stdafv.	MB II	stdafv.	BB I	stdafv.	BB II	stdafv.
<b>NH4-N</b>	Konc, mg/L-N	9,56	0,13	3,04	0,01	2,89	0,04	2,52	0,02	2,39	0,03
	Omsat (ind-ud)			6,51	0,14	6,66	0,17	7,04	0,16	7,16	0,16
<b>NO3-N</b>	Konc, mg/L-N	12,87	0,05	15,62	0,04	15,92	0,12	16,16	0,10	16,39	0,49
	Dannet (ud-ind)			2,75	0,09	3,05	0,17	3,29	0,14	3,52	0,54
<b>NO2-N</b>	Konc, mg/L-N	0,271	0,056	5,348	0,056	5,263	0,033	5,220	0,021	5,190	0,024
	Dannet (ud-ind)			5,077	0,112	4,992	0,090	4,949	0,077	4,918	0,080
Forsøgsnr.3		Indløb	stdafv.	MB I	stdafv.	MB II	stdafv.	BB I	stdafv.	BB II	stdafv.
<b>NH4-N</b>	Konc, mg/L-N	4,09	0,12	1,65	0,01	1,61	0,03	1,86	0,01	1,83	0,02
	Omsat (ind-ud)			2,44	0,13	2,49	0,15	2,23	0,13	2,26	0,14
<b>NO3-N</b>	Konc, mg/L-N	12,47	0,02	14,87	0,06	14,89	0,04	14,64	0,08	14,61	0,08
	Dannet (ud-ind)			2,40	0,09	2,41	0,06	2,17	0,10	2,13	0,10
<b>NO2-N</b>	Konc, mg/L-N	0,206	0,008	0,209	0,004	0,224	0,004	0,263	0,005	0,239	0,004
	Dannet (ud-ind)			0,003	0,012	0,018	0,012	0,058	0,013	0,034	0,012
Forsøgsnr.4		Indløb	stdafv.	MB I	stdafv.	MB II	stdafv.	BB I	stdafv.	BB II	stdafv.
<b>NH4-N</b>	Konc, mg/L-N	3,69	0,02	1,92	0,02	1,86	0,01	2,24	0,09	2,15	0,03
	Omsat (ind-ud)			1,76	0,04	1,83	0,03	1,45	0,11	1,54	0,05
<b>NO3-N</b>	Konc, mg/L-N	12,10	0,13	13,57	0,06	13,77	0,06	13,47	0,23	13,37	0,07
	Dannet (ud-ind)			1,47	0,19	1,67	0,19	1,37	0,35	1,27	0,19
<b>NO2-N</b>	Konc, mg/L-N	0,207	0,001	0,229	0,001	0,231	0,003	0,256	0,004	0,255	0,002
	Dannet (ud-ind)			0,022	0,002	0,024	0,004	0,049	0,005	0,048	0,003
Forsøgsnr. 5 I		Indløb	stdafv.	MB I	stdafv.	MB II	stdafv.				
<b>NH4-N</b>	Konc, mg/L-N	4,28	0,03	2,93	0,02	2,78	0,02				
	Omsat (ind-ud)			1,35	0,05	1,51	0,05				
<b>NO3-N</b>	Konc, mg/L-N	12,05	0,05	13,17	0,05	13,31	0,04				
	Dannet (ud-ind)			1,13	0,10	1,26	0,09				
<b>NO2-N</b>	Konc, mg/L-N	0,207	0,002	0,298	0,002	0,316	0,001				
	Dannet (ud-ind)			0,091	0,004	0,109	0,004				
Forsøgsnr. 5 II		Indløb	stdafv.					BB I	stdafv.	BB II	stdafv.
<b>NH4-N</b>	Konc, mg/L-N	4,28	0,03					3,18	0,03	3,15	0,06
	Omsat (ind-ud)							1,10	0,07	1,13	0,09
<b>NO3-N</b>	Konc, mg/L-N	11,90	0,04					12,85	0,10	12,94	0,05
	Dannet (ud-ind)							0,95	0,14	1,04	0,09
<b>NO2-N</b>	Konc, mg/L-N	0,209	0,003					0,257	0,002	0,277	0,002
	Dannet (ud-ind)							0,048	0,004	0,068	0,005



**BILAG – til afsnit 6 Opholdstidsforsøg**

**Tabel 6-B1.** Omsætning af ammonium til nitrit og nitrat i forsøg B.

MB: Moving bed filtre. BB: Bioblok-filtre. n=3

Forsøgsnr.1		Indløb	stdafv.	MB I	stdafv.	MB II	stdafv.	BB I	stdafv.	BB II	stdafv.
<b>NH4-N</b>	Konc, mg/L-N	8,43	0,15	4,14	0,04	4,13	0,05	3,34	0,11	2,68	0,10
	Omsat (ind-ud)			4,29		4,30		5,09		5,75	
<b>NO3-N</b>	Konc, mg/L-N	13,26	0,09	15,13	0,04	15,58	0,10	15,73	0,01	16,08	0,12
	Dannet (ud-ind)			1,87		2,47		2,33		2,82	
<b>NO2-N</b>	Konc, mg/L-N	0,15	0,02	3,18	0,04	2,58	0,01	3,87	0,08	4,36	0,03
	Dannet (ud-ind)			3,03		2,43		3,71		4,21	
Forsøgsnr.2		Indløb	stdafv.	MB I	stdafv.	MB II	stdafv.	BB I	stdafv.	BB II	stdafv.
<b>NH4-N</b>	Konc, mg/L-N	17,44	0,39	9,88	0,12	9,76	0,14	8,73	0,11	8,22	0,08
	Omsat (ind-ud)			7,56		7,68		8,70		9,22	
<b>NO3-N</b>	Konc, mg/L-N	12,67	0,12	14,62	0,01	14,59	0,04	15,00	0,21	15,31	0,25
	Dannet (ud-ind)			1,95		1,92		2,33		2,63	
<b>NO2-N</b>	Konc, mg/L-N	0,15	0,04	5,73	0,10	5,45	0,02	6,45	0,01	6,41	0,01
	Dannet (ud-ind)			5,58		5,30		6,29		6,26	
Forsøgsnr.3		Indløb	stdafv.	MB I	stdafv.	MB II	stdafv.	BB I	stdafv.	BB II	stdafv.
<b>NH4-N</b>	Konc, mg/L-N	4,70	0,33	2,07	0,03	2,09	0,03	1,86	0,01	1,22	0,00
	Omsat (ind-ud)			2,63		2,61		3,44		3,48	
<b>NO3-N</b>	Konc, mg/L-N	12,68	0,11	15,10	0,06	15,16	0,04	15,89	0,14	16,13	0,06
	Dannet (ud-ind)			2,42		2,48		3,20		3,44	
<b>NO2-N</b>	Konc, mg/L-N	0,12	0,00	0,23	0,00	0,22	0,00	0,17	0,00	0,17	0,00
	Dannet (ud-ind)			0,11		0,10		0,05		0,05	
Forsøgsnr.4		Indløb	stdafv.	MB I	stdafv.	MB II	stdafv.	BB I	stdafv.	BB II	stdafv.
<b>NH4-N</b>	Konc, mg/L-N	3,53	0,05	1,83	0,01	1,83	0,04	2,24	0,09	1,20	0,05
	Omsat (ind-ud)			1,70		1,70		2,34		2,33	
<b>NO3-N</b>	Konc, mg/L-N	13,05	0,03	14,65	0,01	14,62	0,03	15,37	0,02	15,34	0,07
	Dannet (ud-ind)			1,60		1,57		2,33		2,29	
<b>NO2-N</b>	Konc, mg/L-N	0,12	0,00	0,19	0,00	0,20	0,00	0,17	0,00	0,16	0,01
	Dannet (ud-ind)			0,07		0,08		0,04		0,04	
Forsøgsnr. 5 I		Indløb	stdafv.	MB I	stdafv.	MB II	stdafv.	BB I	stdafv.	BB II	stdafv.
<b>NH4-N</b>	Konc, mg/L-N	4,89	0,02	3,70	0,00	3,69	0,02				
	Omsat (ind-ud)			1,18		1,20					
<b>NO3-N</b>	Konc, mg/L-N	13,90	0,01	14,85	0,04	14,88	0,05				
	Dannet (ud-ind)			0,95		0,98					
<b>NO2-N</b>	Konc, mg/L-N	0,15	0,01	0,21	0,02	0,20	0,01				
	Dannet (ud-ind)			0,06		0,05					
Forsøgsnr. 5 II		Indløb	stdafv.	MB I	stdafv.	MB II	stdafv.	BB I	stdafv.	BB II	stdafv.
<b>NH4-N</b>	Konc, mg/L-N	5,10	0,07					3,34	0,01	2,81	0,08
	Omsat (ind-ud)							1,76		2,29	
<b>NO3-N</b>	Konc, mg/L-N	13,85	0,05					15,38	0,03	15,79	0,01
	Dannet (ud-ind)							1,52		1,94	
<b>NO2-N</b>	Konc, mg/L-N	0,15	0,00					0,23	0,01	0,25	0,00
	Dannet (ud-ind)							0,08		0,10	

## BILAG – til afsnit 6 Opholdstidsforsøg

---

**Tabel 6-A2.** Ilt, pH og temperatur logget (hvert 15.min) i indløb og afløb fra filterne i forsøg A.

<b>Indløb</b>	Ilt (mg/l)	Stdafv	Ilt %	Stdafv	Temp. °C	Stdafv	pH	Stdafv
Forsøg 1	5,41	0,48	46,56	4,09	8,7	0,05	6,68	0,08
Forsøg 2	6,19	0,16	52,93	1,34	8,4	0,17	6,76	0,01
Forsøg 3	5,97	0,07	50,94	0,59	8,2	0,00	6,76	0,00
Forsøg 4	5,86	0,12	50,06	1,02	8,3	0,05	6,78	0,00
Forsøg 5 I	5,81	0,06	49,74	0,49	8,3	0,00	6,78	0,00
Forsøg 5 II	5,59	0,09	47,93	0,76	8,3	0,00	6,78	0,00

<b>MB I</b>	Ilt (mg/l)	Stdafv	Ilt %	Stdafv	Temp. °C	Stdafv	pH	Stdafv
Forsøg 1	8,57	0,10	74,07	0,84	8,8	0,1	6,69	0,04
Forsøg 2	9,76	0,33	83,17	2,54	8,2	0,2	6,52	0,04
Forsøg 3	8,33	0,26	71,23	2,12	8,2	0,1	6,76	0,04
Forsøg 4	7,86	0,04	67,54	0,32	8,3	0,0	6,81	0,01
Forsøg 5 I	7,47	0,02	64,32	0,21	8,4	0,1	6,82	0,01

<b>BB I</b>	Ilt (mg/l)	Stdafv	Ilt %	Stdafv	Temp. °C	Stdafv	pH	Stdafv
Forsøg 1	8,37	0,13	72,18	1,06	8,7	0,1	6,68	0,03
Forsøg 2	9,51	0,39	80,86	3,02	8,1	0,2	6,45	0,06
Forsøg 3	8,27	0,23	70,49	1,84	8,1	0,1	6,72	0,04
Forsøg 4	7,91	0,03	67,76	0,27	8,2	0,0	6,81	0,01
Forsøg 5 II	7,54	0,13	64,73	1,05	8,2	0,0	6,83	0,00

<b>MB II</b>	Ilt (mg/l)	Stdafv	Ilt %	Stdafv	Temp. °C	Stdafv	pH	Stdafv
Forsøg 1	10,78	0,03	93,23	0,34	8,8	0,1	6,79	0,03
Forsøg 2	11,57	0,21	98,78	1,45	8,2	0,2	6,61	0,04
Forsøg 3	10,55	0,21	90,35	1,63	8,2	0,1	6,82	0,06
Forsøg 4	10,07	0,04	86,55	0,29	8,3	0,0	6,87	0,01
Forsøg 5 I	9,33	0,04	80,39	0,32	8,3	0,0	6,84	0,00

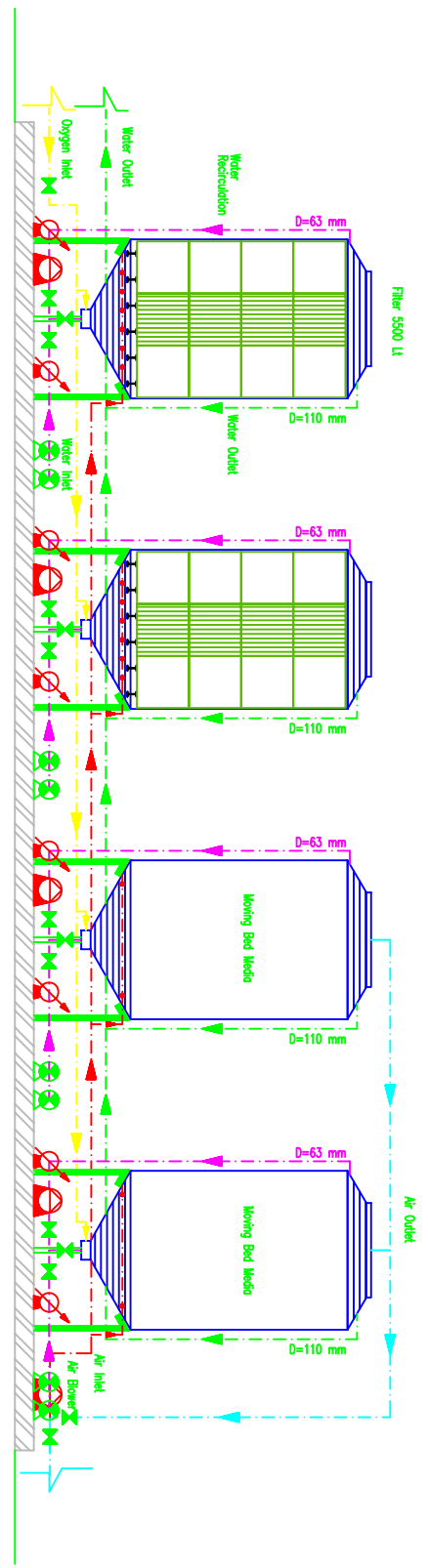
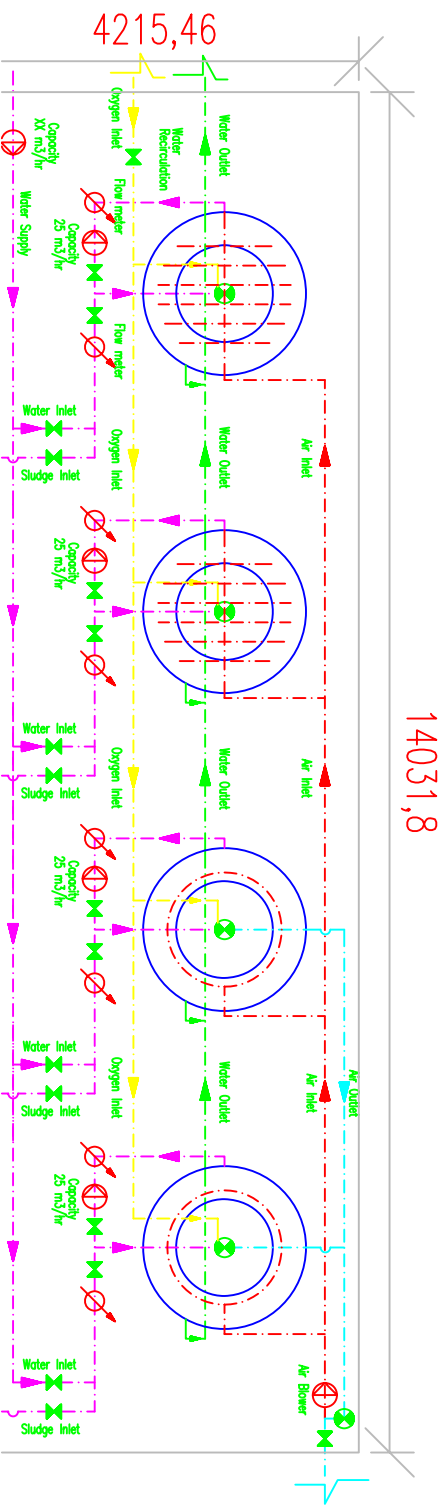
<b>BB II</b>	Ilt (mg/l)	Stdafv	Ilt %	Stdafv	Temp. °C	Stdafv	pH	Stdafv
Forsøg 1	8,88	0,16	76,77	1,38	8,8	0,1	6,63	0,03
Forsøg 2	10,03	0,38	85,41	2,90	8,2	0,2	6,39	0,06
Forsøg 3	8,54	0,26	72,98	2,05	8,1	0,1	6,67	0,04
Forsøg 4	8,12	0,03	69,70	0,24	8,3	0,0	6,75	0,01
Forsøg 5 II	7,84	0,56	67,37	4,80	8,3	0,0	6,79	0,03

## BILAG – til afsnit 6 Opholdstidsforsøg

**Tabel 6-B2.** Ilt, pH og temperatur logget (hvert 15.min) i indløb og afløb fra filterne i forsøg B.

<b>Indløb</b>	Ilt (mg/l)	Stdafv	Ilt %	Stdafv	Temp.°C	Stdafv	pH	Stdafv
Forsøg 1	6,41	0,71	56,20	6,06	7,9	0,17	6,95	0,02
Forsøg 2	6,13	0,24	53,66	2,07	7,8	0,19	6,94	0,02
Forsøg 3	5,82	0,10	50,09	1,33	7,4	0,41	6,88	0,02
Forsøg 4	5,88	0,10	51,55	0,68	8,0	0,22	6,81	0,14
Forsøg 5 I	5,20	0,37	46,34	3,23	8,6	0,05	6,88	0,01
Forsøg 5 II	5,49	0,06	48,39	0,60	8,2	0,08	6,82	0,03
<b>MB I</b>	Ilt (mg/l)	Stdafv	Ilt %	Stdafv	Temp.°C	Stdafv	pH	Stdafv
Forsøg 1	9,33	0,38	82,12	2,84	8,1	0,25	6,59	0,02
Forsøg 2	10,00	0,52	87,73	4,51	7,9	0,14	6,45	0,05
Forsøg 3	8,16	0,05	71,88	0,43	8,3	0,03	6,73	0,01
Forsøg 4	7,78	0,35	68,76	3,10	8,4	0,03	6,76	0,01
Forsøg 5 I	6,82	0,10	60,53	0,88	8,5	0,05	6,75	0,01
<b>BB I</b>	Ilt (mg/l)	Stdafv	Ilt %	Stdafv	Temp.°C	Stdafv	pH	Stdafv
Forsøg 1	9,66	0,34	84,52	2,59	8,0	0,23	6,41	0,03
Forsøg 2	10,23	0,63	89,36	5,50	7,9	0,14	6,19	0,07
Forsøg 3	8,23	0,08	72,08	0,64	8,3	0,03	6,58	0,07
Forsøg 4	8,13	0,14	71,44	1,32	8,4	0,05	6,69	0,06
Forsøg 5 II	7,49	0,29	65,90	2,65	8,4	0,04	6,65	0,02
<b>MB II</b>	Ilt (mg/l)	Stdafv	Ilt %	Stdafv	Temp.°C	Stdafv	pH	Stdafv
Forsøg 1	9,07	0,40	79,82	3,04	8,0	0,23	6,55	0,01
Forsøg 2	9,83	0,59	86,17	5,11	7,9	0,14	6,41	0,05
Forsøg 3	7,91	0,03	69,57	0,24	8,2	0,04	6,69	0,01
Forsøg 4	7,70	0,06	68,04	0,58	8,3	0,00	6,72	0,01
Forsøg 5 I	6,67	0,10	59,20	0,89	8,4	0,05	6,71	0,01
<b>BB II</b>	Ilt (mg/l)	Stdafv	Ilt %	Stdafv	Temp.°C	Stdafv	pH	Stdafv
Forsøg 1	9,68	0,35	85,29	2,75	8,0	0,22	6,34	0,01
Forsøg 2	10,33	0,72	90,92	6,24	8,0	0,16	6,10	0,12
Forsøg 3	7,98	0,02	70,51	0,14	8,3	0,03	6,62	0,02
Forsøg 4	7,79	0,07	69,01	0,61	8,4	0,00	6,67	0,01
Forsøg 5 II	7,33	0,24	64,97	2,16	8,4	0,04	6,58	0,02

## **13. APPENDIX. Tegning af pilotfiltre**



## DTU Aqua-rapportindex

Denne liste dækker rapporter udgivet i indeværende år samt de foregående to kalenderår. Hele listen kan ses på DTU Aquas hjemmeside [www.aqua.dtu.dk](http://www.aqua.dtu.dk), hvor de fleste nyere rapporter også findes som PDF-filer.

- Nr. 158-06 Østers (*Ostrea edulis*) i Limfjorden. Per Sand Kristensen og Erik Hoffmann
- Nr. 159-06 Optimering af fangstværdien for jomfruhummere (*Nephrops norvegicus*) – forsøg med fangst og opbevaring af levende jomfruhummere. Lars-Flemming Pedersen
- Nr. 160-06 Undersøgelse af smoltudtrækket fra Skjern Å samt smoltdødelighed ved passage af Ringkøbing Fjord 2005. Anders Koed
- Nr. 161-06 Udsætning af geddeyngel i danske søer: Effektivurdering og perspektivering. Christian Skov, Lene Jacobsen, Søren Berg, Jimmi Olsen og Dorte Bekkevold
- Nr. 162-06 Avlsprogram for regnbueørred i Danmark. Alfred Jokumsen, Ivar Lund, Mark Henryon, Peer Berg, Torben Nielsen, Simon B. Madsen, Torben Filt Jensen og Peter Faber
- Nr. 162a-06 Avlsprogram for regnbueørred i Danmark. Bilagsrapport. Alfred Jokumsen, Ivar Lund, Mark Henryon, Peer Berg, Torben Nielsen, Simon B. Madsen, Torben Filt Jensen og Peter Faber
- Nr. 163-06 Skarven (*Phalacrocorax carbo sinensis* L.) og den spættede sæls (*Phoca vitulina* L.) indvirkning på fiskebestanden i Limfjorden: Ecopath modellering som redskab i økosystem beskrivelse. Rasmus Skoven
- Nr. 164-06 Kongeåens Dambrug – et modeldambrug under forsøgsordningen. Statusrapport for første måleår af monitoringsprojektet. Lars M. Svendsen, Ole Sortkjær, Niels Bering Ovesen, Jens Skriver, Søren Erik Larsen, Per Bovbjerg Pedersen, Richard Skøtt Rasmussen og Anne Johanne Tang Dalsgaard.
- Nr. 165-06 A pilot-study: Evaluating the possibility that Atlantic Herring (*Clupea harengus* L.) exerts a negative effect on lesser sandeel (*Ammodytes marinus*) in the North Sea, using IBTS-and TBM-data. Mikael van Deurs
- Nr. 166-06 Ejstrupholm Dambrug – et modeldambrug under forsøgsordningen. Statusrapport for første måleår af monitoringsprojektet. Lars M. Svendsen, Ole Sortkjær, Niels Bering Ovesen, Jens Skriver, Søren Erik Larsen, Per Bovbjerg Pedersen, Richard Skøtt Rasmussen og Anne Johanne Tang Dalsgaard.
- Nr. 167-06 Blåmuslinge- og Stillehavsøstersbestanden i det danske Vadehav efteråret 2006. Per Sand Kristensen og Niels Jørgen Pihl
- Nr. 168-06 Tvilho Dambrug – et modeldambrug under forsøgsordningen. Statusrapport for første måleår af monitoringsprojektet. Lars M. Svendsen, Ole Sortkjær, Niels Bering Ovesen, Jens Skriver, Søren Erik Larsen, Per Bovbjerg Pedersen, Richard Skøtt Rasmussen og Anne Johanne Tang Dalsgaard.

- Nr. 169-07 Produktion af blødskallede strandkrabber i Danmark - en ny marin akvakulturproduktion. Knud Fischer, Ulrik Cold, Kevin Jørgensen, Erling P. Larsen, Ole Saugmann Rasmussen og Jens J. Sloth.
- Nr. 170-07 Den invasive stillehavsøsters, *Crassostrea gigas*, i Limfjorden - inddragelse af borgere og interessenter i forslag til en forvaltningsplan. Helle Torp Christensen og Ingrid Elmedal.
- Nr. 171-07 Kystfodring og kystøkologi - Evaluering af revlefodring ud for Fjaltring. Josianne Støttrup, Per Dolmer, Maria Røjbek, Else Nielsen, Signe Ingvarsdén, Per Sørensen og Sune Riis Sørensen.
- Nr. 172-07 Løjstrup Dambrug (øst) - et modeldambrug under forsøgsordningen. Statusrapport for 1. måleår af monitoringsprojektet. Lars M. Svendsen, Ole Sortkjær, Niels Bering Ovesen, Jens Skriver, Søren Erik Larsen, Per Bovbjerg Pedersen, Richard Skøtt Rasmussen og Anne Johanne Tang Dalsgaard.
- Nr. 173-07 Tingkæravad Dambrug - et modeldambrug under forsøgsordningen. Statusrapport for 1. måleår af monitoringsprojektet. Lars M. Svendsen, Ole Sortkjær, Niels Bering Ovesen, Jens Skriver, Søren Erik Larsen, Per Bovbjerg Pedersen, Richard Skøtt Rasmussen og Anne Johanne Tang Dalsgaard.
- Nr. 174-07 Abildtrup Dambrug – et modeldambrug under forsøgsordningen. Statusrapport for 1. måleår af monitoreringsprojektet. Lars M. Svendsen, Ole Sortkjær, Niels Bering Ovesen, Jens Skriver, Søren Erik Larsen, Per Bovbjerg Pedersen, Richard Skøtt Rasmussen, Anne Johanne Tang Dalsgaard.
- Nr. 175-07 Nørå Dambrug – et modeldambrug under forsøgsordningen. Statusrapport for 1. måleår af monitoringsprojektet. Lars M. Svendsen, Ole Sortkjær, Niels Bering Ovesen, Jens Skriver, Søren Erik Larsen, Per Bovbjerg Pedersen, Richard Skøtt Rasmussen, Anne Johanne Tang Dalsgaard.
- Nr. 176-07 Rens Dambrug – et modeldambrug under forsøgsordningen. Statusrapport for 1. måleår af monitoringsprojektet. Lars M. Svendsen, Ole Sortkjær, Niels Bering Ovesen, Jens Skriver, Søren Erik Larsen, Per Bovbjerg Pedersen, Richard Skøtt Rasmussen og Anne Johanne Tang Dalsgaard.
- Nr. 177-08 Implementering af mere selektive og skånsomme fiskerier – konklusioner, anbefalinger og perspektivering. J. Rasmus Nielsen, Svend Erik Andersen, Søren Eliassen, Hans Frost, Ole Jørgensen, Carsten Krog, Lone Grønbæk Kronbak, Christoph Mathiesen, Sten Munch-Petersen, Sten Sverdrup-Jensen og Niels Vestergaard.
- Nr. 178-08 Økosystemmodel for Ringkøbing Fjord - skarvbestandens påvirkning af fiskebestandene. Anne Johanne Dalsgaard, Villy Christensen, Hanne Nicolajsen, Anders Koed, Josianne Støttrup, Jane Grooss, Thomas Bregnballe, Henrik Løkke Sørensen, Jens Tang Christensen og Rasmus Nielsen.
- Nr. 179-08 Undersøgelse af sammenhængen mellem udviklingen af skarvkolonien ved Toftesø og forekomsten af fladfiskeyngel i Ålborg Bugt. Else Nielsen, Josianne Støttrup, Hanne Nicolajsen og Thomas Bregnballe.

- Nr. 180-08 Kunstig reproduktion af ål: ROE II og IIB. Jonna Tomkiewicz, Henrik Jarlbæk
- Nr. 181-08 Blåmuslinge- og stillehavsøstersbestandene i det danske Vadehav 2007. Per Sand Kristensen og Niels Jørgen Pihl
- Nr. 182-08 Kongeåens Dambrug – et modeldambrug under forsøgsordningen. Statusrapport for 2. måleår af monitoringsprojektet med væsentlige resultater fra 1. måleår. Lars M. Svendsen, Ole Sortkjær, Niels Bering Ovesen, Jens Skriver, Søren Erik Larsen, Per Bovbjerg Pedersen, Richard Skøtt Rasmussen og Anne Johanne Tang Dalsgaard.
- Nr. 183-08 Taskekrabben – Biologi, fiskeri, afsætning og forvaltningsplan. Claus Stenberg, Per Dolmer, Carsten Krog, Siz Madsen, Lars Nannerup, Maja Wall og Kerstin Geitner.
- Nr. 184-08 Tvilho Dambrug – et modeldambrug under forsøgsordningen. Statusrapport for 2. måleår af monitoringsprojektet med væsentlige resultater fra 1. måleår. Lars M. Svendsen, Ole Sortkjær, Niels Bering Ovesen, Jens Skriver, Søren Erik Larsen, Per Bovbjerg Pedersen, Richard Skøtt Rasmussen og Anne Johanne Tang Dalsgaard.
- Nr. 185-08 Erfaringsopsamling for muslingeopdræt i Danmark. Helle Torp Christensen, Per Dolmer, Hamish Stewart, Jan Bangsholt, Thomas Olesen og Sisse Redeker.
- Nr. 186-08 Smoltudvandring fra Storå 2007 samt smoltdødelighed under udvandringen gennem Felsted Kog og Nissum Fjord. Henrik Baktoft og Anders Koed.
- Nr. 187-08 Tingkærvad Dambrug - et modeldambrug under forsøgsordningen. Statusrapport for 2. måleår af monitoringsprojektet med væsentlige resultater fra første måleår. Lars M. Svendsen, Ole Sortkjær, Niels Bering Ovesen, Jens Skriver, Søren Erik Larsen, Per Bovbjerg Pedersen, Richard Skøtt Rasmussen og Anne Johanne Tang Dalsgaard.
- Nr. 188-08 Ejstrupholm Dambrug - et modeldambrug under forsøgsordningen. Statusrapport for 2. måleår af monitoringsprojektet med væsentlige resultater fra første måleår. Lars M. Svendsen, Ole Sortkjær, Niels Bering Ovesen, Jens Skriver, Søren Erik Larsen, Per Bovbjerg Pedersen, Richard Skøtt Rasmussen og Anne Johanne Tang Dalsgaard.
- Nr. 189-08 The production of Baltic cod larvae for restocking in the eastern Baltic. RESTOCK I. 2005-2007. Josianne G. Støttrup, Julia L. Overton, Sune R. Sørensen (eds.)
- Nr. 190-08 USER'S MANUAL FOR THE EXCEL APPLICATION "TEMAS" or "Evaluation Frame". Per J. Sparre.
- Nr. 191-08 Evaluation Frame for Comparison of Alternative Management Regimes using MPA and Closed Seasons applied to Baltic Cod. Per J. Sparre.
- Nr. 192-08 Assessment of Ecosystem Goods and Services provided by the Coastal Zone System Limfjord. Anita Wiethüchter.
- Nr. 193-08 Modeldambrug under forsøgsordningen. Faglig slutrapport for "Måle- og dokumentationsprojekt for modeldambrug". Lars M. Svendsen, Ole Sortkjær, Niels Bering Ovesen, Jens Skriver, Søren Erik Larsen, Susanne Bouttrup, Per Bovbjerg Pedersen, Richard Skøtt Rasmussen, Anne Johanne Tang Dalsgaard og Karin Suhr
- Nr. 194-08 Omsætning af ammonium-kvælstof i biofiltre på Modeldambrug. Karin Isabel Suhr,



Per Bovbjerg Pedersen, Lars M. Svendsen, Kaare Michelsen og Lisbeth Jess Plesner.