

# Temadag

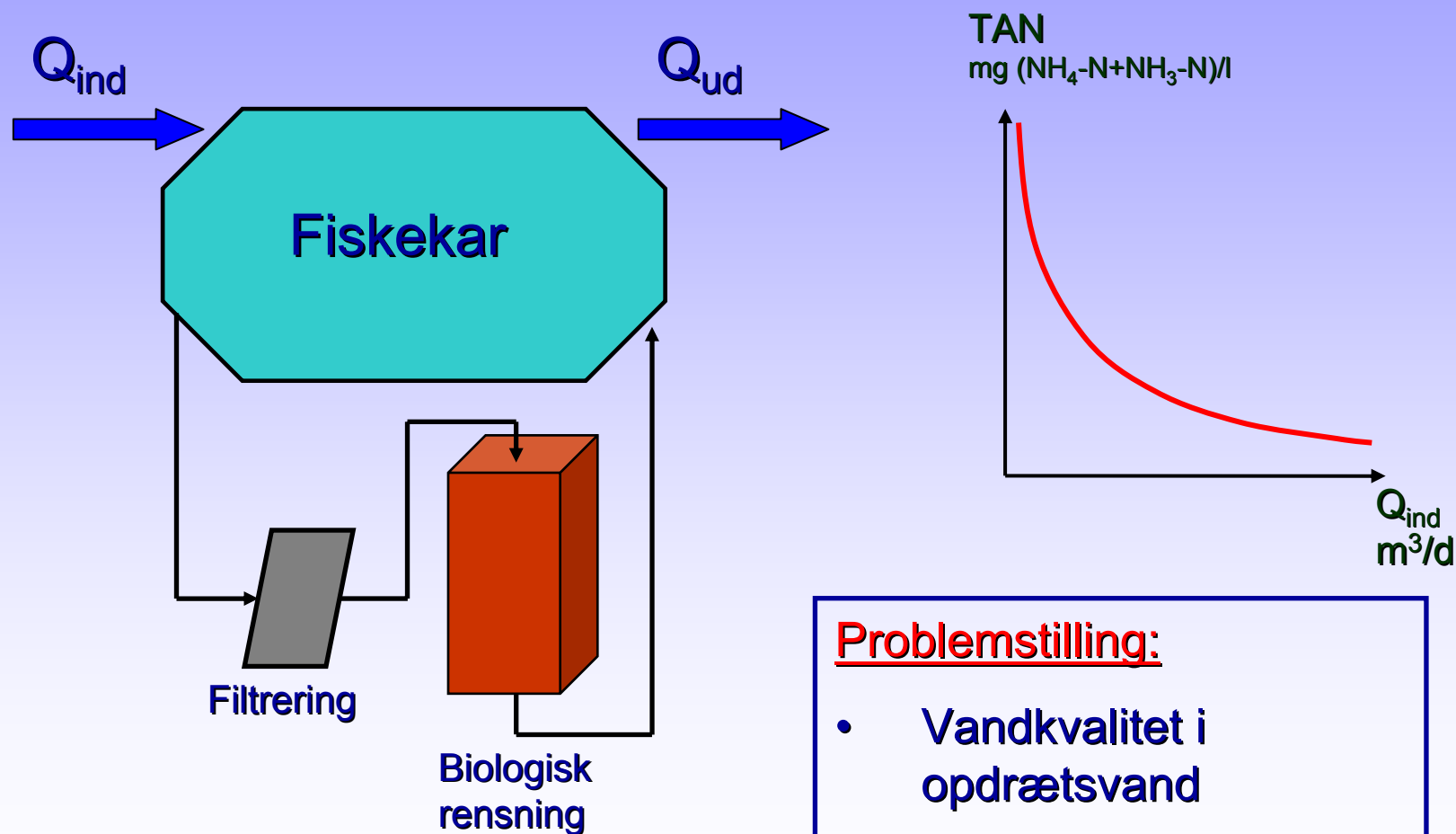
## Vandbehandling i recirkulerede opdrætsanlæg

# Biologisk rensning i recirkulerede opdrætsanlæg

- Kinetik i biofilter anlæg

*Kenneth Janning*  
*DHI*

# Recirkulation i fiske opdrætsanlæg



## Problemstilling:

- Vandkvalitet i opdrætsvand
- Vandkvalitet ved udledning til recipient

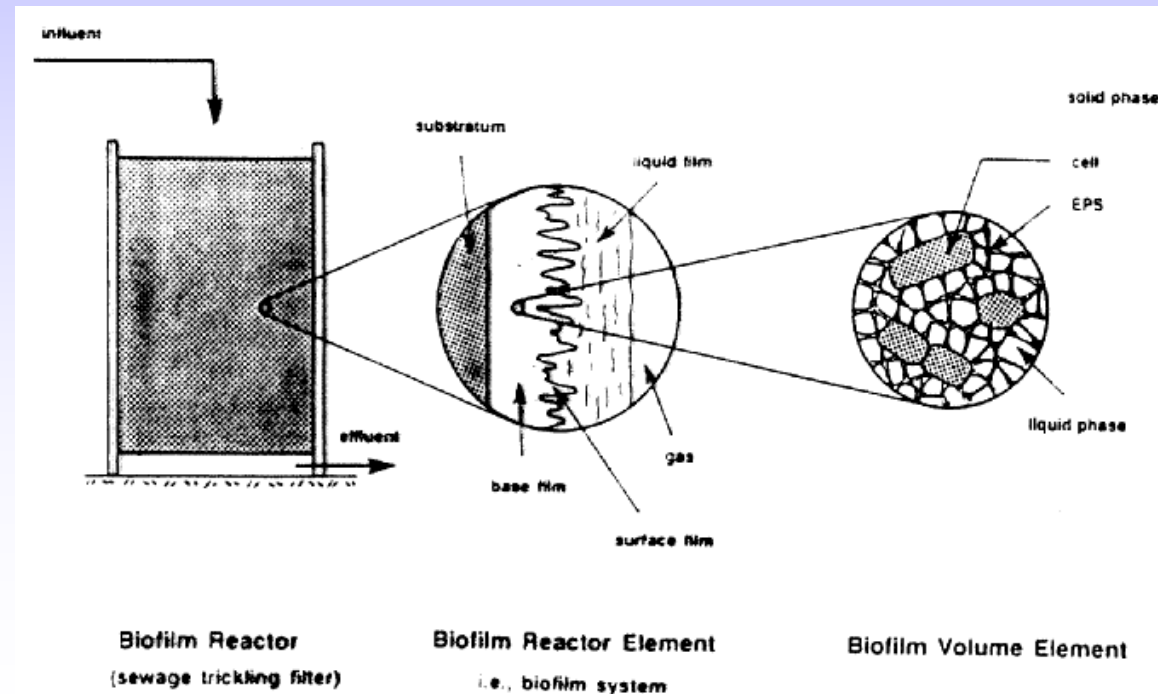
# Processer og kinetik i biologiske filtre

---

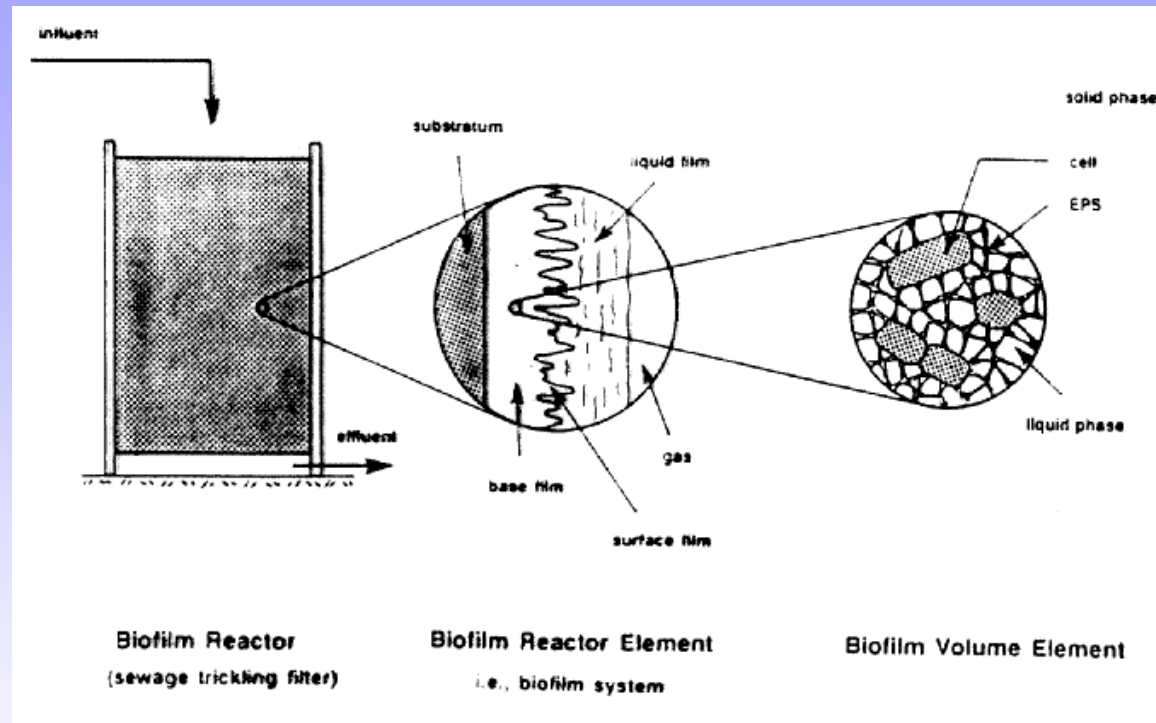
- Hvad er en biofilm?
- Hvorfor anvende biofilm teknologi som rensning i fiske opdrætsanlæg?
- Biologiske processer i biofiltre
- Biofilm kinetik – procesbeskrivelser og omsætningshastigheder
- Vandkvalitetskrav's betydning for design af biofiltre
- Populationsdynamik i biofiltre – konkurrencen om ilten

# Hvad er en biofilm?

- Et biofilter består af et **medie** (plast, sten, træ, metal...) med **stor overflade** hvorpå en "**biofilm**" af bakterier sidder fasthæftet og fikseret i et fintmasket netværk (EPS)
- Biofilmen tilføres **næring** når filtret beskylles med opdrætsvand indeholdende stoffer som primært udskilles fra fiskene. Stofferne transporteres ind i biofilmen ved **molekylær diffusion**



# Hvad er en biofilm?



- Bakterierne i biofilmen **formerer sig** ved næringstilførslen, hvilket får biofilmen til at vokse sig **tykkere**
- Bakterierne i biofilmen lever i en **økologisk balance** som får de hurtigst voksende til at **udkonkurrere** de langsommere voksende, afhængigt af den næring og koncentrationen hvormed næringen tilføres

# Hvorfor anvende biofilm teknologi til fiske opdrætsanlæg?

---

## Fordele ved anvendelse af biofiltre til fiske opdrætsanlæg

- Biofiltre ideelle til biologisk rensning af opløste stoffer
- Biofiltre kan opretholde en høj celleopholdstid
- Langsomt voksende bakterier (nitrifikanter) udvaskes ikke
- Processtabil...
- Beskyttelse i biofilm
- Kan udsættes for en høj og variabel hydraulisk belastning
- Kompakt og ofte simpelt design
- Selvrensende...
- Mulighed for integreret løsning af CO<sub>2</sub>-fjernelse, iltning, køling samt nitrifikation (Rislefiltre)

# Hvorfor anvende biofilm teknologi til fiske opdrætsanlæg?

## **Risici ved anvendelse af biofiltre til fiske opdrætsanlæg**

- Følsomme overfor overbelastning (rislefiltre)
- Manglende biofilmkontrol
- Ukontrollabel biofilmafrivning
- Tilstopning af biofiltre
- Lang oppodningstid (nitrifikation)
- Forskellig populationdynamisk vækst giver risiko for overbegroning af nitrifikanter
- Diffusionsbegrænset omsætning resulterer i lav omsætningshastigheder ved rensning i lave koncentrationer

# Stoffjernelse i recirkulerede fiske opdrætsanlæg

---

- Partikler (ned til 40-60  $\mu\text{m}$ ) → *Filtrering*
- Total Ammoniak, TAN ( $\text{NH}_4^++\text{NH}_3$ ) → *Biofilter*
- Nitrit,  $\text{NO}_2^-$  → *Biofilter*
- Nitrat,  $\text{NO}_3^-$  → *Biofilter*
- Opløst omsætteligt COD → *Biofilter*
- $\text{CO}_2$  → *Biofilter/udluftning*

*Biofiltrene er den **mest følsomme** procesenhed, som sammen med den fysiske filtrering udgør **kernen i den rensningsmekanisme** som kan opretholde en **god og ensartet vandkvalitet** i et recirkuleret fiske opdrætsanlæg.*



# Nitrifikationen

## – nøgleprocessen i det biologiske renseanlæg

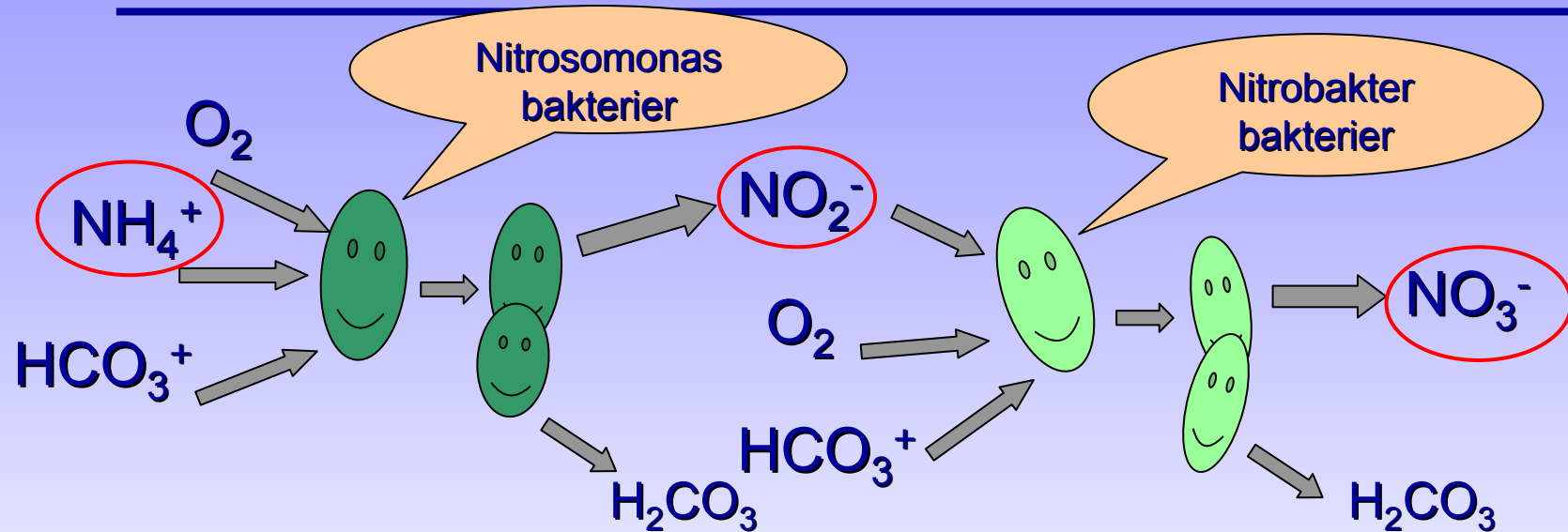
---

### Problemstillinger ved nitrifikation i biofiltre

- Nitrifikanter er langsomt voksende → *lang oppodningstid*
- Nitrifikanter skal konkurrere med hurtigere voksende bakterier om den tilstedeværende ilt i biofilmen → *overbegroning*
- Vandkvalitetskravet til TAN er ofte meget lavt → *lav omsætningshastighed*
- Meget følsomme overfor fald i alkalinitet, pH og temperatur → *lav omsætningshastighed*
- Kan under "stressede" forhold producere nitrit → *toksisk i vandmiljø*
- Er følsomme overfor partikler i vandet, som kan "afskærme" bakterierne i at få tilstrækkelige iltbetingelser → *Filtrering foran biofiltre ofte påkrævet*

# Nitrifikationen

– nøgleprocessen i det biologiske renselanlæg



## AUTOTROFE BAKTERIER KRÆVER:

- +  $\text{NH}_4^+$  (elektron doner, energikilde)
- +  $\text{O}_2$  (elektron acceptor, iltningsmiddel)
- + Alkalinitet
- + Uorganisk kulstof
- ÷ Organisk stof (COD)

# Denitrifikationen

## –processen som sikrer fuld kvælstoffjernelse

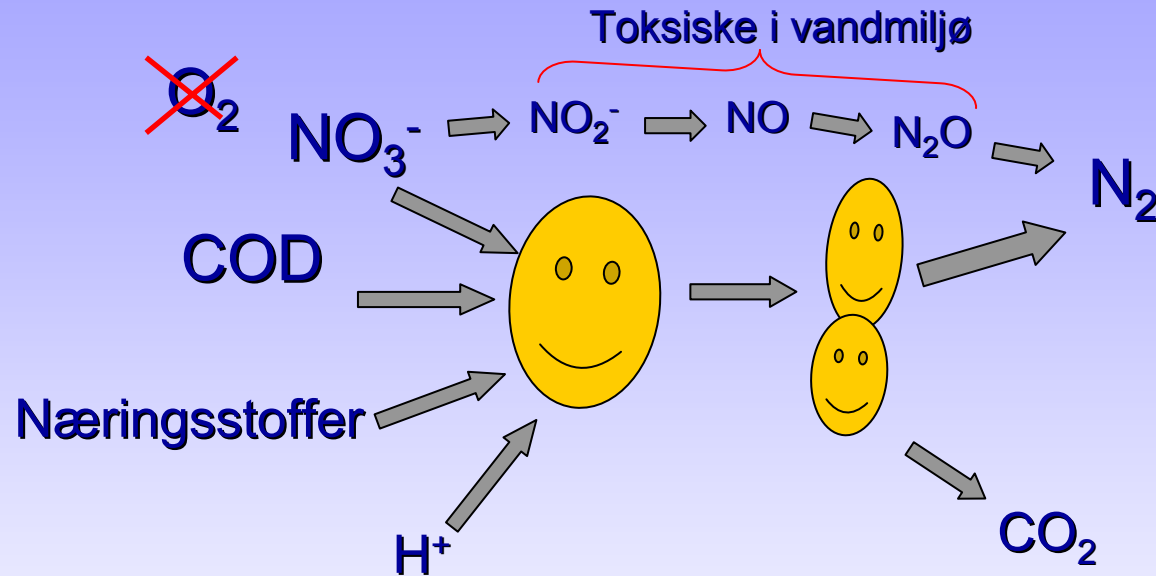
---

### Problemstillinger ved denitrifikation i biofiltre

- Kræver organisk kulstof
- De fleste DN bakterier kan både bruge ilt og nitrat som iltningsmiddel for omsætning af COD. Er både ilt og nitrat tilstede vil de først omsætte ilten pga. et større energiudbytte
- Kulstofkilden skal være på opløst form og være letomsættelig
- Iltfølsom
- Kan under ”stressede” forhold producere nitrit

# Denitrifikationen

– processen som sikrer fuld kvælstoffjernelse



## HETEROTROFE BAKTERIER KRÆVER:

- + Organisk stof (COD)
- +  $\text{NO}_3^-$  og  $\text{O}_2$
- + Aciditet
- + Næringsstoffer, N, P, K, Fe, ...

# Nitrifikation – Denitrifikationen

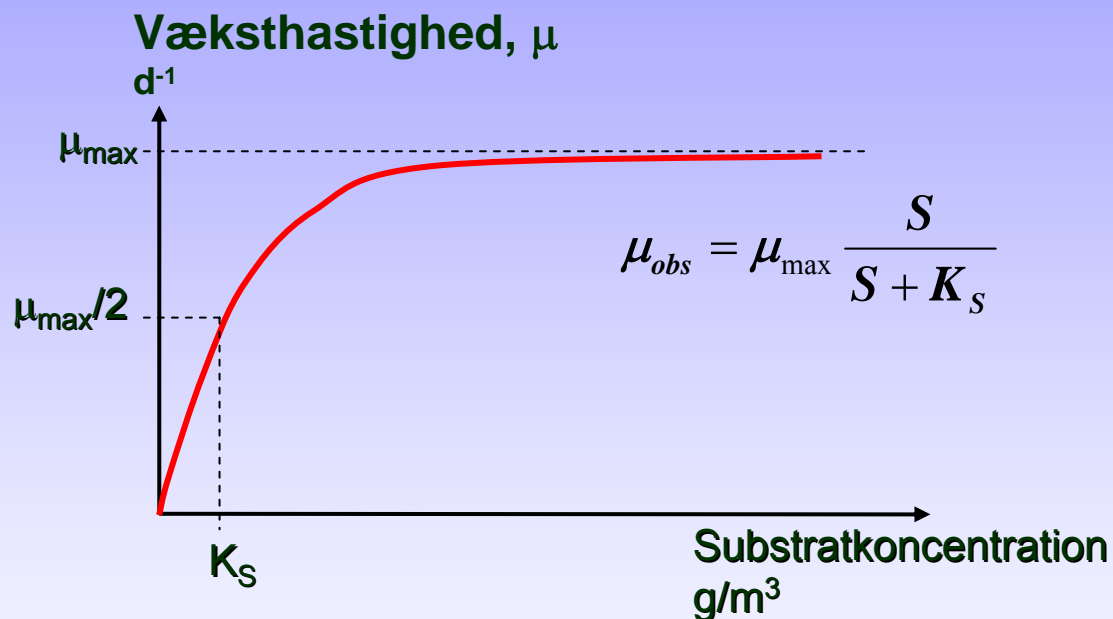
---

## **Problemstillinger ved kombineret nitrifikation (N) – denitrifikation (DN) i biofiltre**

- N kræver ilt, DN tåler ikke ilt
- DN kræver organisk stof, organisk stof er en trussel mod N
- DN bakterier vokser væsentligt hurtigere end N bakterier
- Heterotrofe bakterier vil helst omsætte ilt og COD. Dermed kan COD kilden let reduceres til skade for de denitrificerende bakterier

# Kinetik i biofiltre

## Omsætning i den enkelte bakterie:



### $K_S$ -værdier, nitrifikation (Nitrisomonas)

- $K_{S,NH_4} = 0,3-0,7 \text{ g NH}_4\text{-N}/m^3$
- $K_{S,O_2} = 0,5-1,0 \text{ g O}_2/m^3$

### $K_S$ -værdier, nitrifikation (Nitrobakter)

- $K_{S,NH_4} = 0,8-1,2 \text{ g NH}_4\text{-N}/m^3$
- $K_{S,O_2} = 0,5-1,5 \text{ g O}_2/m^3$

# Kinetik i biofiltre

---

## Omsætning i en biofilm:

Omsætning i biofilmen :  $r_{vf} = \frac{\partial N}{\partial x}$ ;

Transport af stof ind i biofilmen :  $N = -D \frac{\partial S_f}{\partial x}$ ;

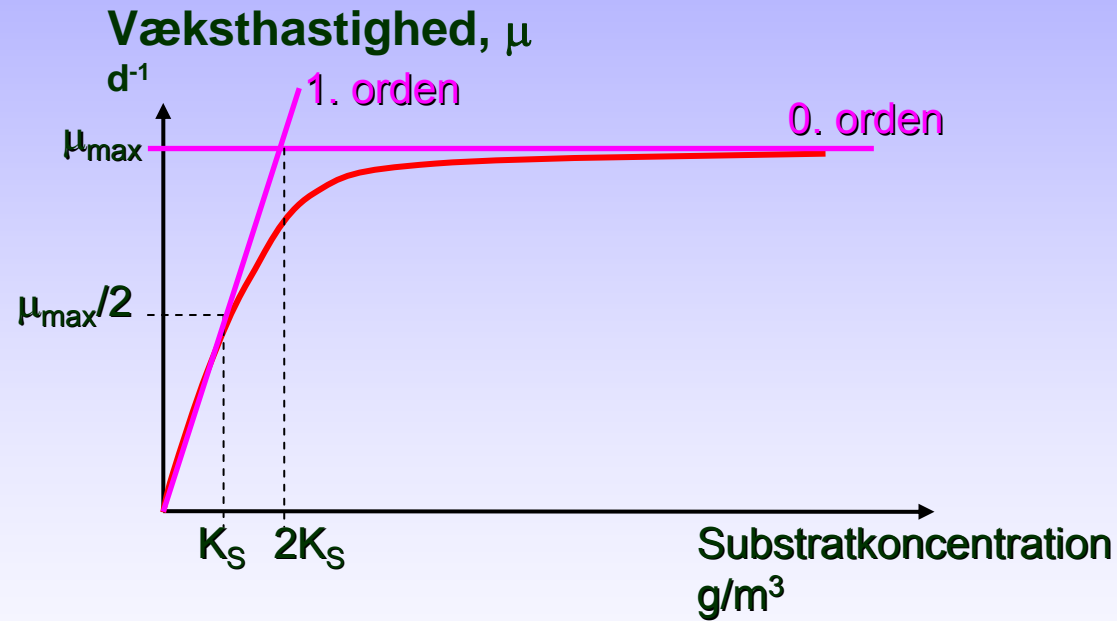
Omskrivning :  $\frac{\partial N}{\partial x} = -D \frac{\partial^2 S_f}{\partial x^2}$ ;

Omsætning af stof i biofilmen med stoftransport (diffusion) :  $\frac{\partial^2 S_f}{\partial x^2} = -\frac{r_{vf}}{D}$

Beskrivelse af  $r_{vf}$  ?

# Kinetik i biofiltre

## Omsætning i biofilmen:



1. ordens tilfældet:  $r_{vf} = k_{1f} \cdot S_{vf}$

0. ordens tilfældet:  $r_{vf} = k_{0f}$



# Kinetik i biofiltre

## 1. ordens proces i biofilm

---

### Omsætning i vandfasen udenfor biofilmen:

1. ordens tilfældet:  $S < 2 \cdot K_s$

$$r_A = k_{1f} \cdot L \cdot \frac{\tanh \alpha}{\alpha} \cdot S, \quad \alpha = \sqrt{-\frac{k_{1f} \cdot L^2}{D}}$$

$r_A$  = arealspecifik omsætnings hastighed i vandfasen  $[\text{gS}/\text{m}^2/\text{d}]$

$k_{1f}$  = 1.ordens hastigheds konstant  $[\text{d}^{-1}]$

$L$  = biofilm tykkelsen  $[\text{m}]$

$D$  = diffusions konstant,  $S$   $[\text{m}^2 / \text{d}]$

# Kinetik i biofiltre

## 0. ordens proces i biofilm

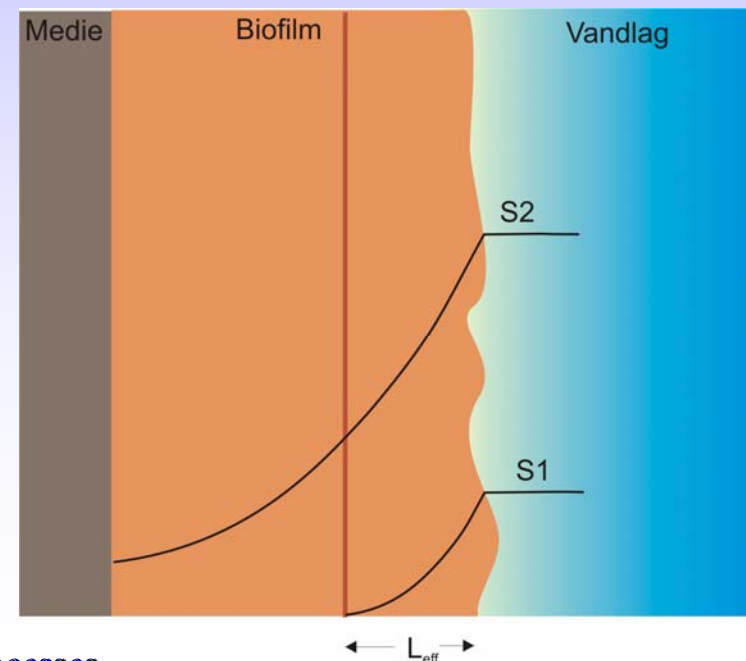
### Omsætning i vandfasen udenfor biofilmen:

0. ordens tilfældet:  $S > 2 \cdot K_s$

Indtrængnings dybde i biofilmen:  $\beta = \sqrt{\frac{2 \cdot D \cdot S}{k_{0f} \cdot L^2}}$

$\beta > 1$ : Biofilmen fuldt penetreret (S2)

$\beta < 1$ : Biofilmen delvist penetreret (S1)



# Kinetik i biofiltre

## 0. ordens proces i biofilm

### Omsætning i vandfasen udenfor biofilmen:

0. ordens tilfældet:  $\beta > 1$

$$r_A = k_{0f} \cdot L$$

$r_A$  = arealspecifik omsætnings hastighed i vandfasen  $[\text{gS}/\text{m}^2 / \text{d}]$

$k_{0f}$  = omsætnings hastighed i biofilmen  $[\text{g}/\text{m}^3 \text{biofilm} / \text{d}]$

$L$  = biofilmens tykkelse  $[\text{m}]$

0. ordens tilfældet:  $\beta < 1$

$$r_A = k_{1/2A} \cdot \sqrt{S}, \quad k_{1/2A} = \sqrt{2 \cdot D \cdot k_{0f}}$$

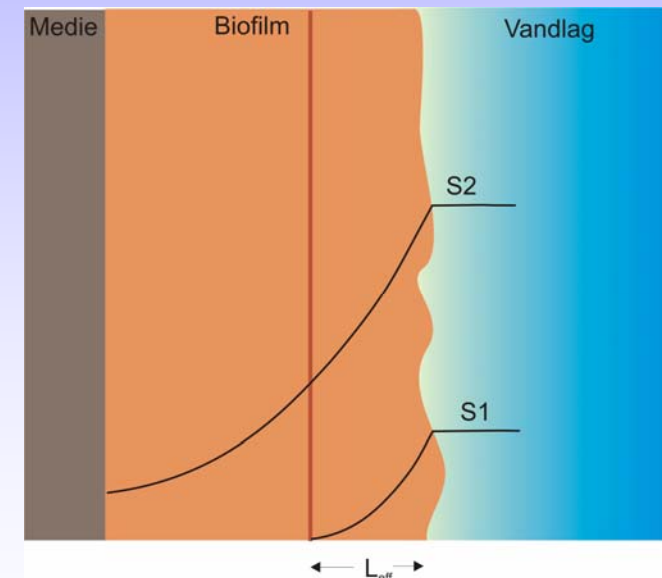
$r_A$  = arealspecifik omsætnings hastighed i vandfasen  $[\text{gS}/\text{m}^2 / \text{d}]$

$k_{1/2A}$  = 1/2. ordens hastigheds konstant  $[\text{gS}^{1/2} \cdot \text{m}^{-1/2} \cdot \text{d}^{-1}]$

$S$  = substrat koncentrationen i **vandfasen**  $[\text{gS}/\text{m}^3]$

$D$  = diffusions konstant,  $S$   $[\text{m}^2 / \text{d}]$

$k_{0f}$  = omsætnings hastighed i biofilm  $[\text{gS}/\text{m}^3 \text{biofilm} / \text{d}]$



# Kinetik i biofiltre

---

## Problemstillinger, diffusionsbegrænset omsætning i biofilm

- Stofkoncentrationen *i vandfasen* af det substrat som styrer omsætningshastigheden (nitrifikation: ilt, TAN?) bestemmer reaktionshastigheden og reaktionsordnen (1. orden,  $\frac{1}{2}$ . orden, 0. orden) i vandfasen af biofiltret
- Ved rensning ned til meget lave stofkoncentrationer ( $< 1 \text{ mg NH}_4\text{-N/l}$ ) bliver **reaktionshastigheden i biofiltret meget lav**
- Ved rensning ned til meget lave stofkoncentrationer ( $< 1 \text{ mg NH}_4\text{-N/l}$ ) vil kun en **meget lille del af biofilmen være aktiv** (10 – 20 $\mu\text{m}$ )
- Ved rensning ned til meget lave koncentrationer er det kun relevant at operere med en meget tynd biofilm
- Ved rensning nede i lave koncentrationsregimer **kompliceres kinetikforholdene** væsentligt, hvilket vanskeliggøre analytisk fortolkning af forholdene i biofiltret

# Kinetik i biofiltre

## Direkte gennemstrømmet biofilter

0. ordensreaktion :

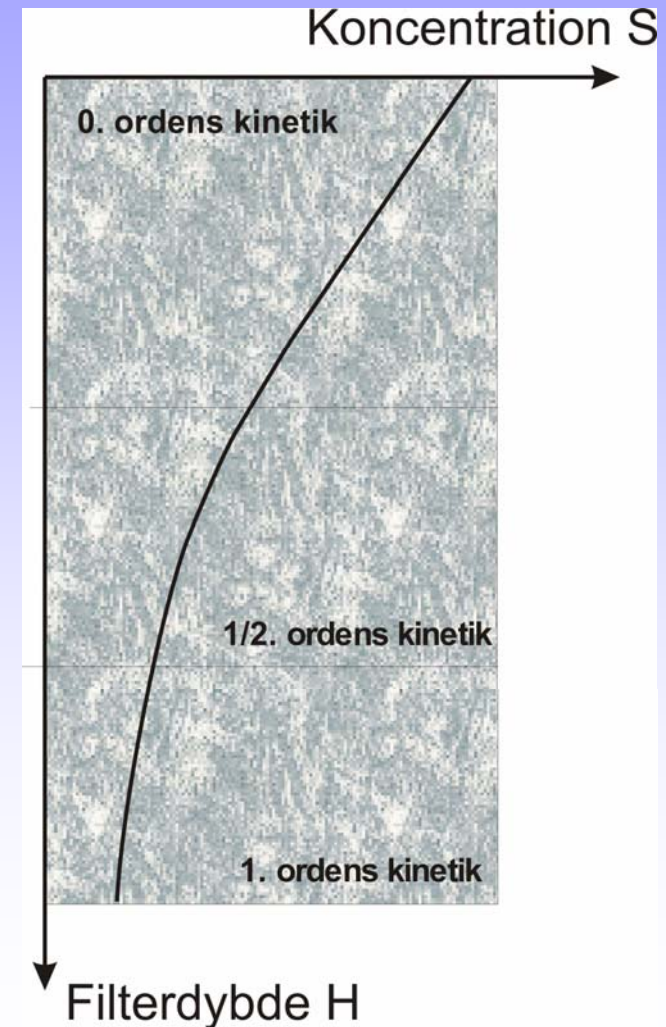
$$S_{ud} = \frac{S_{ind} \cdot V \cdot \omega \cdot k_{0a}}{Q}$$

1/2. ordensreaktion :

$$S_{ud} = \left( \sqrt{S_{ind}} + \frac{\omega \cdot k_{1/2a} \cdot V}{2 \cdot Q} \right)^2$$

1. ordensreaktion :

$$S_{ud} = S_{ind} \cdot e^{-\frac{V \cdot \omega \cdot k_{1a}}{Q}}$$



# Kinetik i biofiltre

## Ideelt oplandet biofilter

0. ordensreaktion :

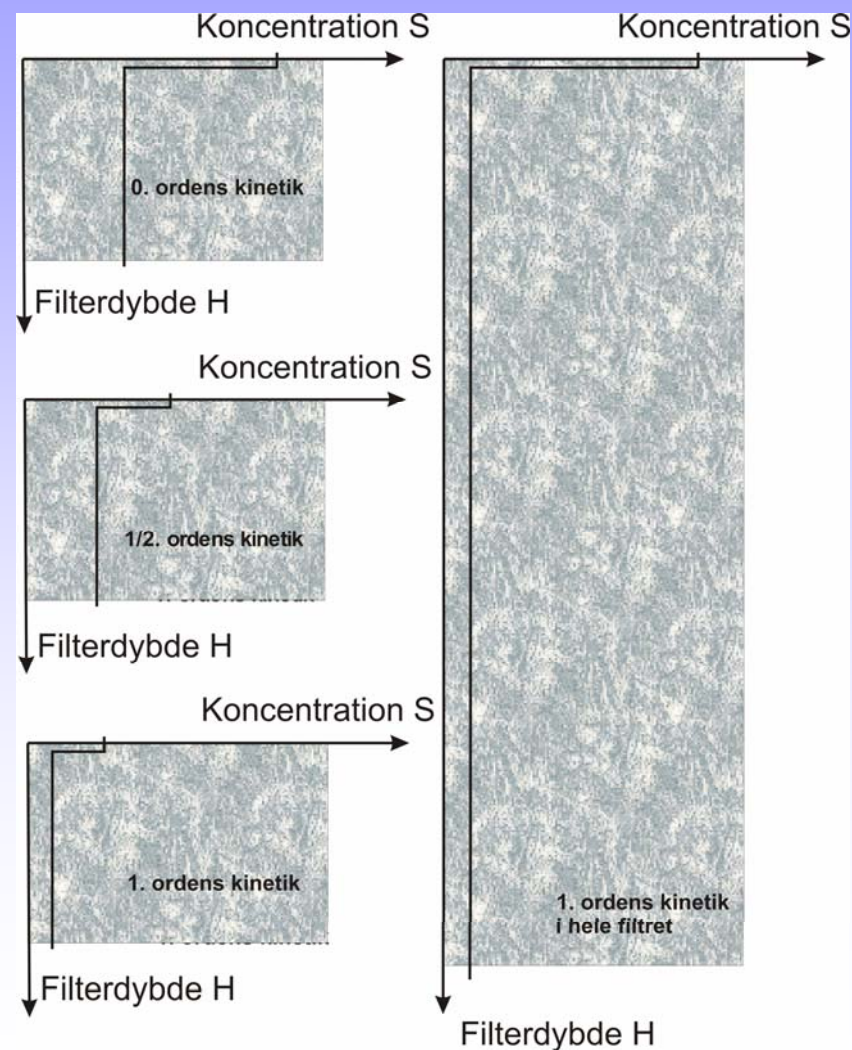
$$S_{ud} = S_{ind} - \frac{k_{0a} \cdot A}{Q}$$

1/2. ordensreaktion :

$$S_{ud} = \left( \sqrt{\left( \frac{k_{1/2a} \cdot A}{2 \cdot Q} \right)^2 + S_{ind}} - \frac{k_{1/2a} \cdot A}{2 \cdot Q} \right)^2$$

1. ordensreaktion :

$$S_{ud} = \frac{Q \cdot S_{ind}}{Q + k_{1a} \cdot A}$$



# Vandkvalitetskrav, fiskeopdræt

Water quality limits,  $C_{limit}$  ( $g/m^3$ )

Water quality parameter	African catfish <sup>a</sup>	European eel <sup>b</sup>	Tilapia <sup>c</sup>	Trout <sup>c</sup>
Temperature ( $^{\circ}C$ )	25–27	23–26	24–30	10–18
$O_2$ ( $g/m^3$ )	3–8	>6	4–6	6–8
$CO_2$ ( $g/m^3$ )	<25	<25 <sup>d</sup>	40–50	20–30
SS ( $g/m^3$ )	<25	<25	<15 <sup>e</sup>	<10 <sup>e</sup>
$NH_3-N$ ( $g/m^3$ )	<0.05	<0.05 <sup>d</sup>	<0.06	<0.02
TAN ( $g/m^3$ )	<8 <sup>f</sup>	<8 <sup>f</sup>	<3	<1
$NO_2-N$ ( $g/m^3$ )	<0.1	<15 <sup>g</sup>	<1	<0.1
$NO_3-N$ ( $g/m^3$ )	<100	<100	–	–
Chloride ( $g/m^3$ )	–	–	>200	>200

(-) values unknown.

<sup>a</sup> From Eding and van Weerd (1999).

<sup>b</sup> From Kamstra (1998).

<sup>c</sup> From Timmons et al. (2002).

<sup>d</sup> From Heinsbroek and Kamstra (1990).

<sup>e</sup> From Timmons et al. (2001).

<sup>f</sup> At pH 7.

<sup>g</sup> From Kamstra et al. (1996).

## Vandkvalitetskravenes betydning for omsætningshastigheden i biofiltre?

E.H.Eding et al. (2006). "Design and operation of nitrifying trickling filters in recirculating aquaculture: A review". *Aquaculture Engineering*, vol.34, pp. 234-260



# Omsætningshastigheder fiskeopdrætsanlæg

Overview of pilot scale reactors, experimental conditions and kinetic parameters in relation to TAN and NO<sub>2</sub>-N elimination (PLASTIC supporting medium: Filterpak<sup>®</sup>-CR50, Mass Transfer Int., Heversham, Cumbria, UK, specific surface area 200 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>; void fraction 0.93)

Adaptation conditions (trickling filter biofilm)	Experimental monitoring conditions (batch experiments)	$r_{\text{TAN}}$ or $r_{\text{NO}_2\text{-N}}$ (g/m <sup>2</sup> /day)	0-order or 1/2-order kinetics	Limiting substrate
(a) Trickling filter HSL = 70–250 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /day; temperature: 15 °C; Rainbow Trout: 20 kg/m <sup>3</sup>	Submerged mode, 15 °C, 0–12 g TAN/m <sup>3</sup> , pH 7, CO <sub>2</sub> = 9 g/m <sup>3</sup>	$r_{\text{TAN}} = 0.25$ $r_{\text{TAN}} = 0.22$ $r_{\text{TAN}} = 0.14$	0-order 1/2-order 1/2-order	Oxygen TAN TAN
	$C_{\text{TAN}} = 3 \text{ g/m}^3$			
	$C_{\text{TAN}} = 2 \text{ g/m}^3$ $C_{\text{TAN}} = 1 \text{ g/m}^3$			
(a) Trickling filter HSL = 210 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /day; temperature 25 °C; pH 7 African catfish: 90–160 kg/m <sup>3</sup>	Submerged mode; 25 °C, 0–12 g TAN/m, pH 7; CO <sub>2</sub> = 6.4 ± 0.7 g/m <sup>3</sup>  $C_{\text{TAN}} = 9.9 \pm 6.9 \text{ g/m}^3$	$r_{\text{TAN}} = 0.55 \pm 0.13$	0-order	Oxygen

$$r_A = 0,25 \text{ gTAN/m}^2/\text{d} \quad \Rightarrow \quad A_{\text{N\ddot{o}dvendigt}} = 100 \text{ m}^2$$

$$r_A = 0,22 \text{ gTAN/m}^2/\text{d} \quad \Rightarrow \quad A_{\text{N\ddot{o}dvendigt}} = 113 \text{ m}^2$$

$$r_A = 0,14 \text{ gTAN/m}^2/\text{d} \quad \Rightarrow \quad A_{\text{N\ddot{o}dvendigt}} = 178 \text{ m}^2$$

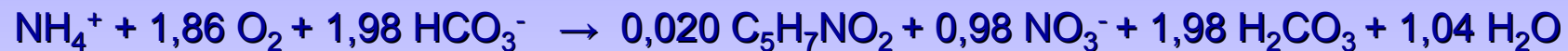


## 2 komponent diffusion

### Nitrifikation

---

### *Iltbegrænsning eller ammoniumbegrænsning?*



$$v_{\text{O}_2, \text{NH}_4} = 4,25 \text{ g O}_2/\text{g NH}_4\text{-N}$$

$$\frac{S_{\text{O}_2}}{S_{\text{TAN}}} = v_{\text{O}_2, \text{TAN}} \cdot \frac{D_{\text{TAN}}}{D_{\text{O}_2}} \approx 3,4 - 3,6 \frac{\text{gO}_2 / \text{m}^3}{\text{gTAN} / \text{m}^3}$$

$$S_{\text{O}_2} > 3,4 - 3,6 \cdot S_{\text{TAN}} \Rightarrow \text{ammonium begrænsning (eller 0.ordens kinetik)}$$

$$S_{\text{O}_2} < 3,4 - 3,6 \cdot S_{\text{TAN}} \Rightarrow \text{ilt begrænsning (eller 0.ordens kinetik)}$$

Rensning til 1 g TAN/m<sup>3</sup> → 3,4 g O<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> nødvendig i vandfase

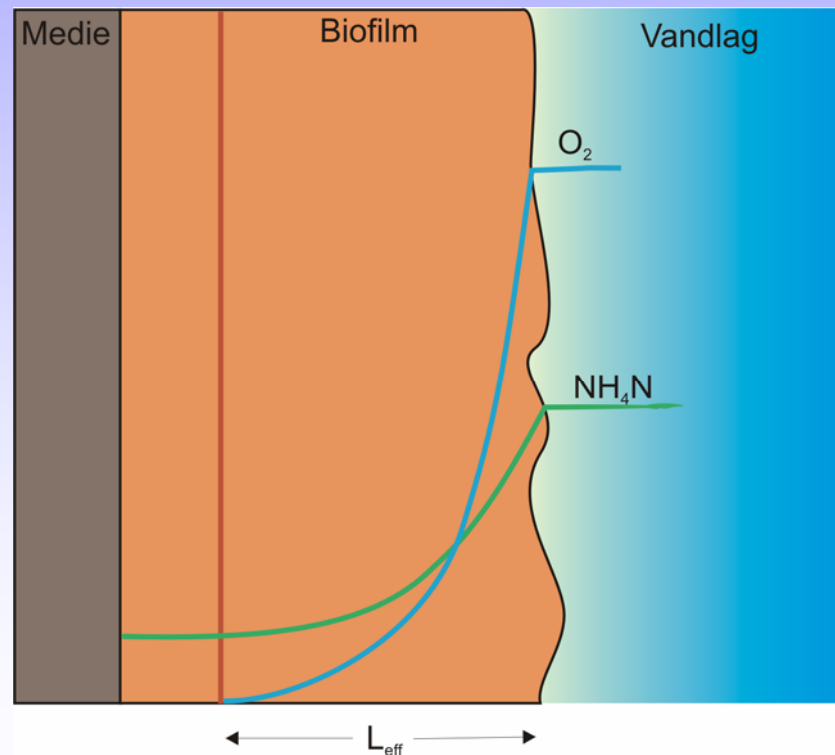
Rensning til 2 g TAN/m<sup>3</sup> → 6,8 g O<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> nødvendig i vandfase

Rensning til 3 g TAN/m<sup>3</sup> → 10,2 g O<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> nødvendig i vandfase

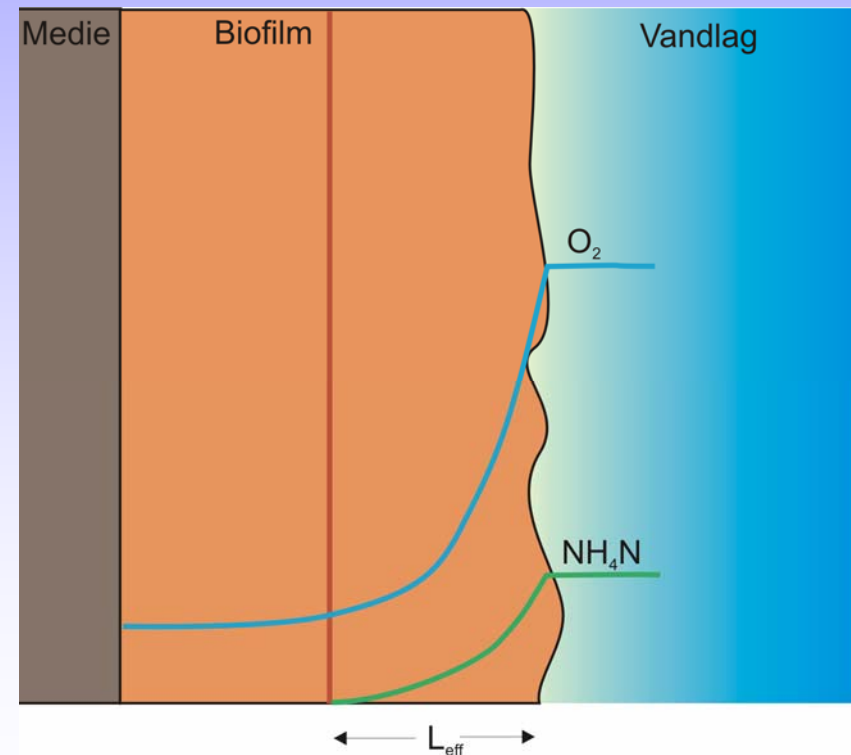
# 2 komponent diffusion

## Nitrifikation

### Iltbegrænset nitrifikation



### Ammoniumbegrænset nitrifikation



# Populationsdynamik i biologiske filtre

## Problemstillinger, populationsdynamik

- Ved tilledning af opløst letomsætteligt COD vokser heterotrofe bakterier hurtigt op (enten med ilt eller med nitrat)
- Når  $BOD_5 > 5 \cdot O_2$  trænger det organiske stof længere ind i biofilmen en ilten, hvilket fuldstændigt fjerner de nitrificerendes bakteriers mulighed for at få ilt
- De heterotrofe bakterier vokser 10 gange hurtigere end de autotrofe bakterier, hvilket dels resulterer i en hurtigere voksende biofilm og dels resulterer i at de heterotrofe bakterier vil sætte sig i et lag yderst på biofilmen og omsætte al ilten

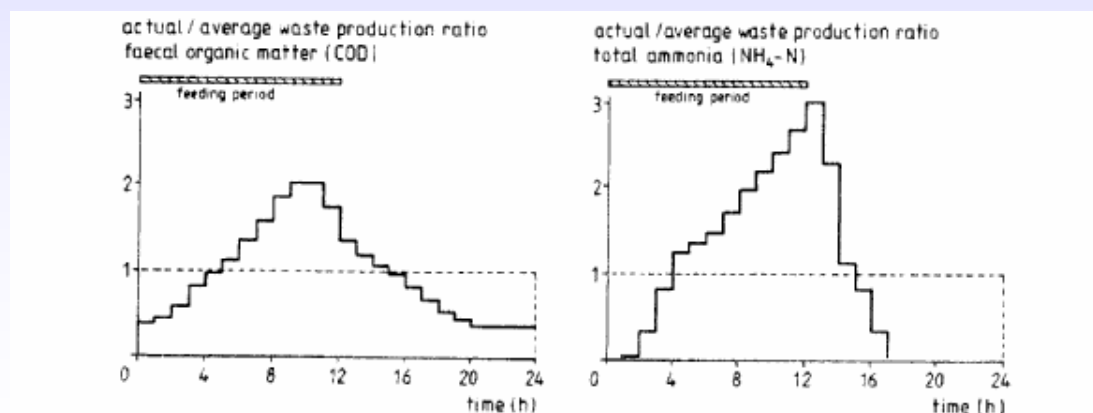
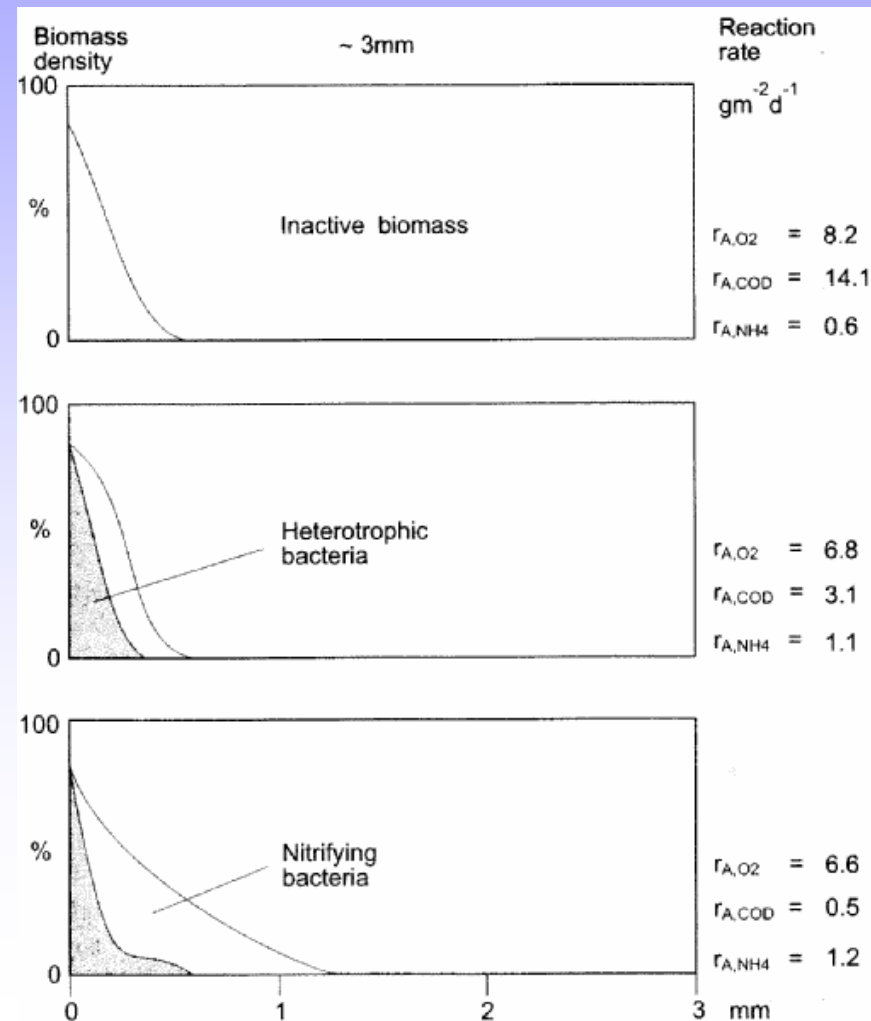


Fig. 6. Fluctuation over 24 h of the production of waste material by the African catfish. Average production rate (dotted line): assuming a constant release of the total amount of waste during 24 h.

# Populationsdynamik i biologiske filtre

## Overbevoksning af nitrificerende bakterier i en biofilm



# Populationsdynamik i biologiske filtre

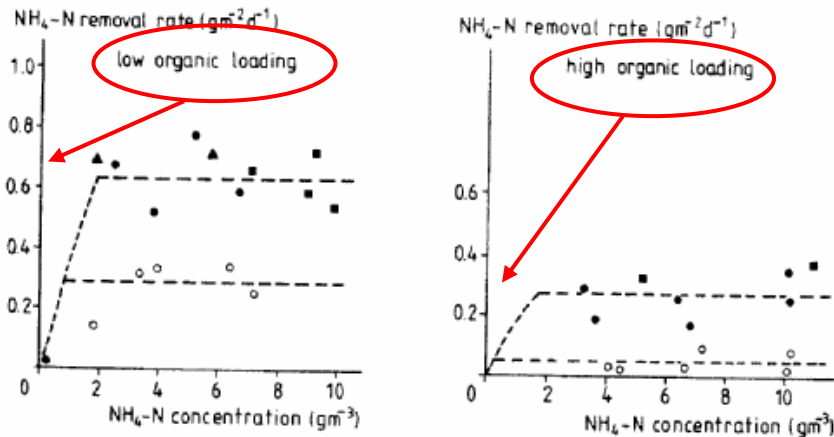
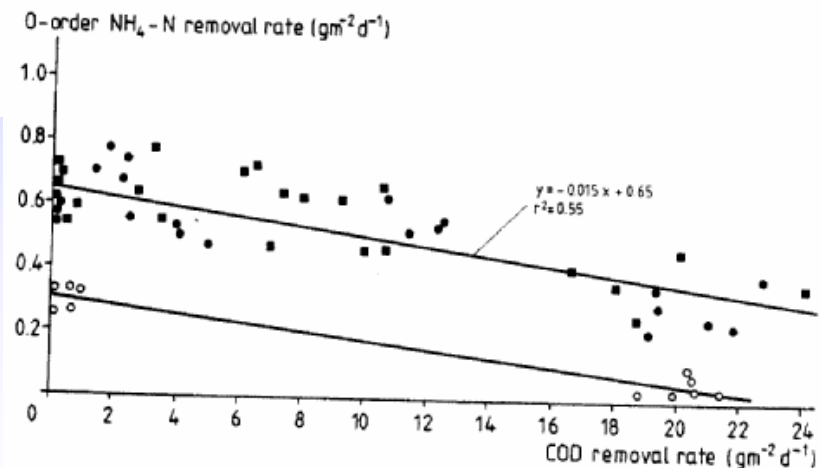


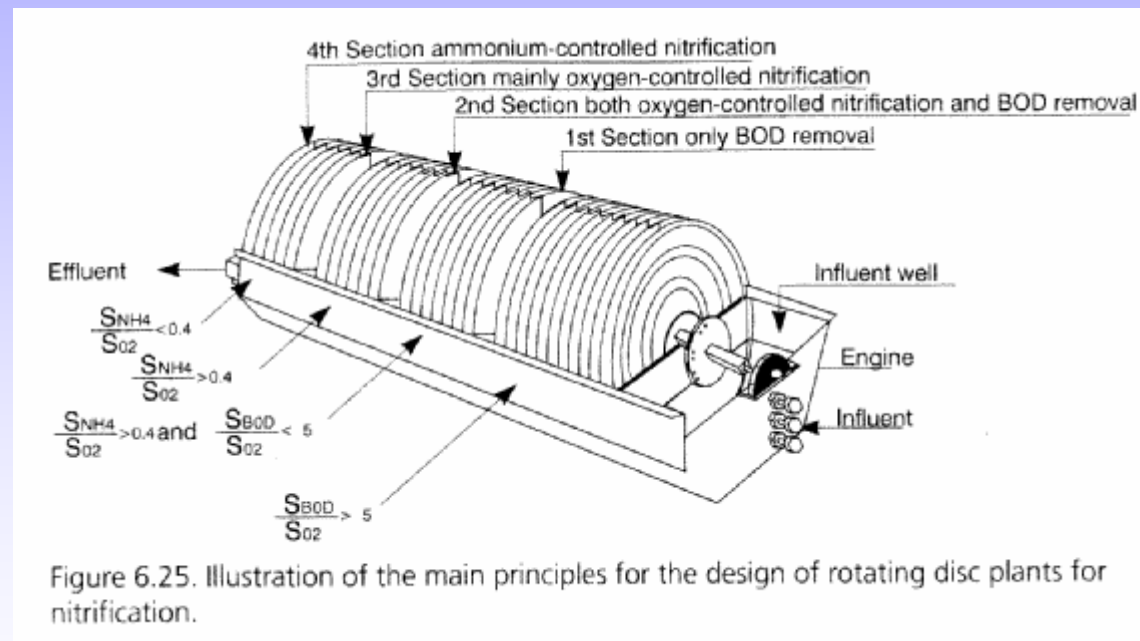
Fig. 3. Biofilm nitrification rates in relation to the total ammonia concentration under varying monitoring conditions: dissolved oxygen level (●, ■, ▲, 7 g m<sup>-3</sup>, ○, 3 g m<sup>-3</sup>), short term (3–4 h) organic matter loading rate (low: 1 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> COD; high: 20 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), origin of the biofilm sample (■, ▲, artificial biofilm; ●, ○, operative biofilm), mode of hydraulic loading (●, ○, ■, submerged mode; ▲, trickling mode).



Effect of simultaneous organic matter removal induced by short term loading on the zero-order biofilm nitrification rate (legend as in Fig. 3).

# Populationsdynamik i biologiske filtre

## Ændret reaktionskinetik i en RBC reaktor



# Omsætningsvariationer i praksis

## Fodringens betydning for stofvariationer? (TAN, NO<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>)

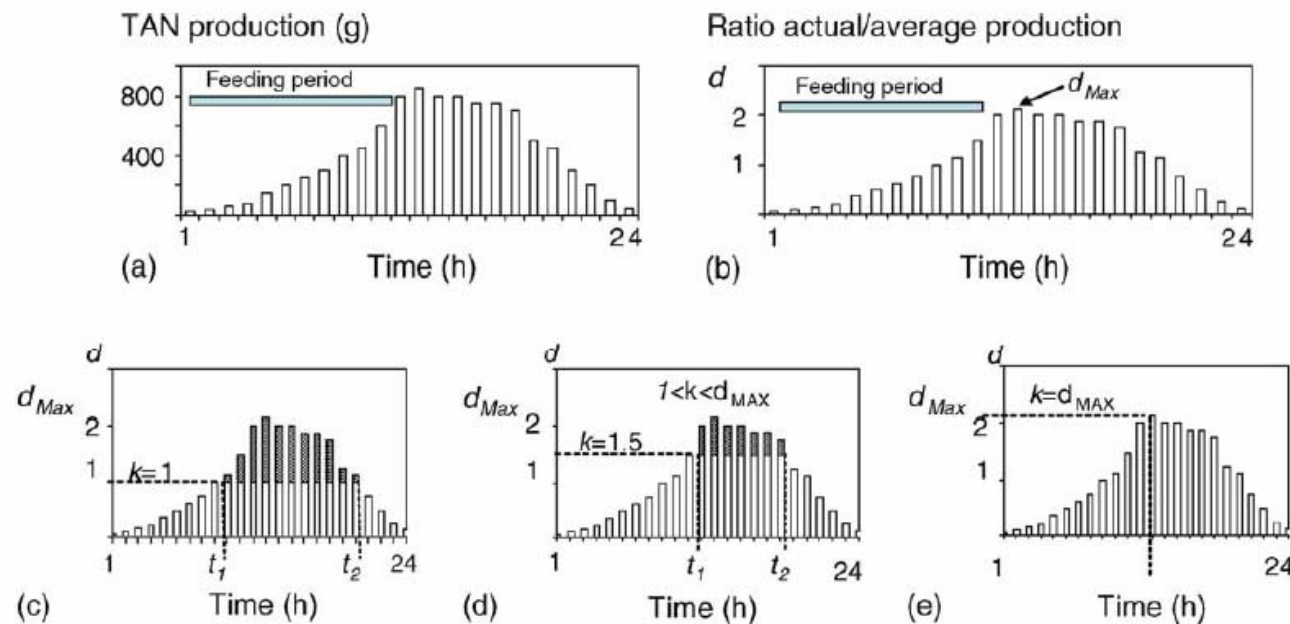


Fig. 1. Diurnal variation in TAN production (g TAN/h): (a) variation in relation to feeding; (b) variation expressed as ratio actual/average TAN production; (c–e) the accumulation of TAN (shaded area) in relation to the removal capacity of the biofilter, (c) filter is designed to remove average ( $k = 1$ ) level of TAN production; (d) the filter is designed to remove more than the average but less than the peak production ( $d_{max}$ ) of TAN; (e) filter designed to remove the peak levels of TAN ( $d_{max}$ ).

# Konklusion

---

- Biofiltre er den **mest velegnede biologiske proces** til fjernelse af opløste stoffer i recirkulerede fiskedambrug
- Partikelfjernelse og opløst organisk stoffjernelse er et væsentligt element i opnåelsen af en **sikker og effektiv nitrifikations proces**
- Behov for effektiv rensning i meget lave koncentrationsområder resulterer i en **komPLICERING af biofilmkinetikken** ( $O_2$ /TAN begrænsning, 0., ½. og 1. ordens kinetik)
- Kun **tynde** biofilm! Tykkere biofilm (mere end 100-200  $\mu\text{m}$ ) er unødvendig og kan føre til forstoppelse af biofiltre når biofilmen afrives i store kager
- Samspillet mellem **fiskefodring og dimensionering/drift af biofiltre** er væsentlig for undgåelse af stoffluktuationer i fiske karrene
- Modellering og styring af samspillet mellem fiskeproduktion og vandrensning vil kunne føre til en mere **ensartet og optimal vandkvalitet** i fiske karrene
- Samspillet mellem **partikelfjernelse, biologisk rensning og kemiske oxidations metoder** (for fjernelse af geosminer, rest-COD og hygiejnisering) er væsentlig for opnåelse af en driftssikker produktion