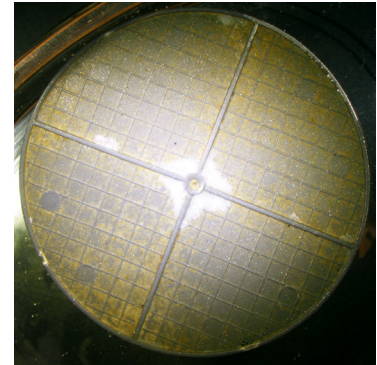
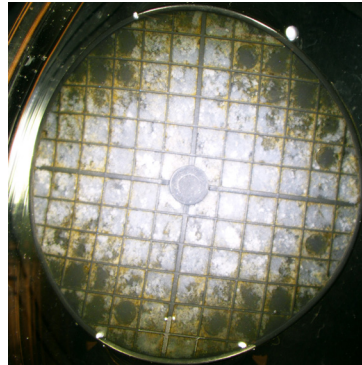
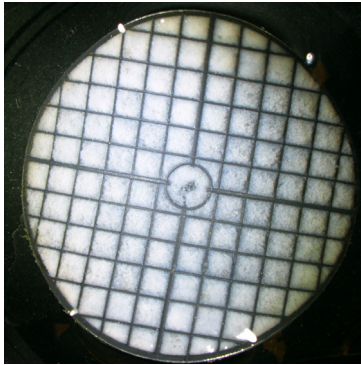


Nitrifikation i biofilmen i en IFAS

Effekten av bärartyp, C:N-kvot, DO samt konkurrens med mikrodjur



LUNDS
UNIVERSITET

Magnus Lindén

Vattenförsörjnings- och Avloppsteknik
Institutionen för kemiteknik, LTH
Examensarbete 2020

Nitrifikation i biofilmen i en IFAS

Effekten av bärartyp, C:N-kvot, DO samt konkurrens med mikrodjur

av

Magnus Lindén

Examensarbete VVAM05

VA-Teknik
Institutionen för Kemiteknik
Lunds Universitet

Januari 2020

Handledare: Michael Cimbritz, Lunds Universitet
Maria Piculell, AnoxKaldnes
Christian Rosén, AnoxKaldnes
Examinator: Åsa Davidsson, Lunds Universitet

Sammanfattning

Ökande belastningar, hårdare krav på avloppsreningsverk och ytbegränsningar skapar ett behov av kompakta, effektiva processlösningar. En sådan lösning är en Integrated Fixed film Activated Sludge (IFAS) som kombinerar en aktivslam (AS) med en biofilmsprocess. För att kunna dimensionera en IFAS bättre har den här studien fokuserat på hur faktorer som C:N-kvot och biofilmstjocklek kan påverka den nitrifierande förmågan på bärare i en IFAS. Möjligheten att använda bioWin för att modellera en 400 μm biofilm har också undersökts.

Försöksburar med olika bärare placerades i en högbelastad AS på Sjölunda avloppsreningsverk i Malmö. De placerades så att de utsattes för olika C:N-kvoter. Även bärare från en fullskalig IFAS undersöktes som referenspunkt. Bärarnas nitrifikationshastigheter och biomassor bestämdes. Bärarna mikroskopades också under försöksperioden för att följa biofilmsframväxten.

De förhållanden som experimentburarna utsattes för gav goda förutsättningar för ett mikrodjur, ciliater, att etableras. De förhindrade stabil nitrifikation på samtliga bärare förutom Anox KTM Z50 som mekaniskt hämmade tillväxt av ciliater. Även om nitrifikationen uttryckt per m^2 var lägre på Z50 än de jämförda bärarna från den fullskaliga IFAS:en fanns tecken på att den skulle fortsätta öka. Hastigheten uttryckt per g biomassa var avsevärt högre för Z50 vilket tyder på en mer specialiserad biomassa. Eftersom mängden heterotrofer minskar skulle detta kunna innebära ett potentiellt sänkt syrebehov, men eventuellt också sämre sedimenteringsegenskaper eftersom mikrodjur kan förbättra dessa.

Även de burar som var utsatta för den högsta C:N-kvoten klarade av att nitrifiera. För att hitta den kvot där heterotrofer konkurrerar ut autotrofer hade alltså experimentet behövt belastas med mera COD. De burar som hade en högre C:N-kvot fick mera biomassa. Det tros bero på att heterotrofer trivdes bättre där.

Modellen av en 400 μm biofilm i bioWin förutsåg en kraftig konkurrens med heterotrofer och mycket lite nitrifikation. Detta är delvis rätt, men modellen kommer framförallt inte att ge mer nitrifikation vid en tunnare biofilm och därför bedöms den metod som användes i bioWin inte fungera väl för att förutsäga beteendet hos biofilmer.

Innehåll

1	Introduktion	1
1.1	Syfte	1
2	Bakgrund	3
2.1	Vad är en IFAS?	3
2.2	Organismer i avloppsvattenrening	3
2.3	Uppehållstider	3
2.4	Bärare och Biofilmstjocklek	3
2.5	Förhållanden som påverkar nitrifierande biofilmer	4
3	Metod	7
3.1	Sjölunda	7
3.2	Experimentuppställning	8
3.3	Analys av bärare och biofilm	10
3.4	Modell i BioWin	12
4	Resultat	15
4.1	Experiment	15
4.2	Modell	20
5	Diskussion	23
5.1	Metoden	23
5.2	Nitrifikationshastigheter	24
5.3	C:N-kvoten	25
5.4	Ciliaternas utbredning	26
5.5	Nitritbildning och sänkt DO	26
6	Slutsats	27
6.1	Framtida studier	28
	Referenser	29

Förkortningar

AOB	ammoniumoxiderande bakterier
AS	aktivslam
bCOD	biologiskt nedbrytbart COD
BOD₇	biokemisk syreförbrukning
COD	kemisk syreförbrukning
CSTR	kontinuerligt omrörd tankreaktor
DO	löst syre
IFAS	Integrated Fixed film Activated Sludge
ISS	inert suspenderat material
MBBR	Moving Bed Biofilm Reactor
MCRT	medeluppehållstid för celler
MLSRT	slammets uppehållstid
NOB	nitritoxiderande bakterier
sbCOD	löst biologiskt nedbrytbart COD
sCOD	löst COD
SRT	partikulär upphållstid
TKN	totalt Kjeldahl kväve
TN	total kvävekoncentration
TP	total fosforkoncentration
TSS	totalt suspenderat material

1 Introduktion

För att livet ska kunna fortsätta i sjöar och hav behöver samhället vara försiktigt med vad som släpps ut. En viktig del i detta är vattnet som används och släpps ut i avloppen. Det passerar ett avloppsreningsverk före det går ut till ett mottagande hav, sjö eller å. Typiska ämnen som behöver tas om hand i avloppsreningsverken är kol och kväve. Om de kommer ut i haven kan de orsaka syrebrist och i förlängningen döda bottnar. Det är något som redan har hänt i Östersjön.

Behovet av avloppsvattenrening är ständigt växande. Befolkningen ökar i städerna vilket ökar belastningen på många befintliga anläggningar. Parallellt ökar reningskraven på avloppsreningsverken vilket ställer nya krav på anläggningarna. Till råga på allt växer ofta städerna närmare reningsverken och begränsar expansionsytan. Detta skapar ett behov av kompakta och effektiva lösningar på avloppsreningsverken. En kompakt lösning som går att bygga in i en befintlig anläggning är en Integrated Fixed film Activated Sludge (IFAS). Det är en process som kombinerar en aktivslam (AS) med en biofilmsprocess med ett bärrmaterial. För att den ska bli kompakt och klara hårda utsläppskrav behöver den dimensioneras korrekt. Det handlar om att välja rätt bärrsteg, ha en lämplig belastning och välja rätt material för biofilmen att växa på. Även driftsparametrar som syresättning och slamålder blir viktiga. Den här studien har fokuserat på vilken nitrifikation som kan förväntas vid olika förhållanden så som C:N-kvot och löst syre (DO).

Ett populärt material att använda i en IFAS är suspenderade bärare. En relativt ny gren inom bärare är att använda en som styr tjockleken på biofilmen. Det har i tidigare studier visat sig påverka nitrifikationen (Piculell 2016; Torresi m. fl. 2016). I denna studie har ett antal olika bärare använts för att skapa en bättre förståelse för hur nitrifikationen i en IFAS påverkas av valet av bärare.

1.1 Syfte

Syftet är att skapa en bättre förståelse för nitrifikationen i en IFAS med suspenderade bärare vid varierande förhållanden. Målet med studien är att bestämma:

- Hur C:N-kvoten och DO påverkar nitrifikationen på bärarna i en IFAS.
- Vilka bärare och därigenom biofilmstjocklek som lämpar sig bäst för en nitrifierande IFAS vid höga C:N-kvoter.
- Potentialen i att använda en kommersiell modelleringsmjukvara, BioWin för att förutsäga hur en bärare kommer att nitrifiera i en IFAS.

2 Bakgrund

2.1 Vad är en IFAS?

I en AS sker vattenreningen av suspenderad biomassa, i motsatt till en Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) där reningen sker av en fixerad biomassa, en biofilm som växer på suspenderade bärare. En kombination av dessa två tekniker med bärare placerade i en AS kallas en IFAS. På så vis kan den totala biomassan i bassängen höjas och reningen kan bli effektivare. Biofilmen i en IFAS kommer ha två funktioner: Dels att bryta ner substrat, men också att ympa biomassa till den suspenderade fasen. Den ympade biomassan kommer att ha samma sammansättning som biofilmen och påverkar till stor del funktionen av anläggningen. Moretti m. fl. (2015) fann att 67 % av nitrifikationen i en IFAS skedde i biofilmen, och det återstående i slammet.

2.2 Organismer i avloppsvattenrening

Två dominerande bakterietyper i en konventionell avloppsrening är heterotrofer, som bryter ner kemisk syreförbrukning (COD) och autotrofer som nitrifierar. Men det finns mer än bakterier som växer i biologiska reningsprocesser. Det finns svampar, arkéer, alger, protozoer och i viss mån högre djur. Svampar dominerar sällan och akreer är mest relevanta vid anaeroba processer. Alger kräver solljus och är inte intressanta i en AS eller IFAS. Protozoer är mikrodjur som ofta har en viktig roll i att bryta ner bakterier eller suspenderat organiskt material vilket förbättrar sedimenteringsegenskaperna. De kräver en lång partikulär upphållstid (SRT) för att kunna existera och finns typiskt rikligt i en lågbelastad AS. (Jansen m. fl. 2019)

2.3 Uppehållstider

En viktig driftsparameter i en AS är slammets uppehållstid (MLSRT). En för låg MLSRT kommer att orsaka en bortspolning, att bakterier lämnar systemet snabbare än de växer till sig. Autotrofer är mer känsliga än heterotrofer eftersom de har en långsammare tillväxthastighet. Införandet av bärare genom att använda en IFAS skapar en biofilm med längre uppehållstid än slammet. Det innebär att autotrofer som aldrig kan överleva i slammet har en chans i biofilmen.

Uppehållstiden i en biofilm kan variera och en tidigare studie har visat på att nitrifikation uppkommer vid en medeluppehållstid för celler (MCRT) i biofilmen på 12.8 dagar men uteblir vid 4 dagar vid en temperatur på 18-20 °C (Orantes och González-Martinez 2004).

2.4 Bärare och Biofilmstjocklek

Bärare kan se olika ut och bestå av olika material. Huruvida detta påverkar biofilmen är debatterat. Vad gäller konsumtion av COD har Ødegaard m. fl. (2000) påvisat att form och storlek av bärare inte spelar någon roll, det som är viktigt är biofilmens area. I en liknande studie där nitrifikation varit i fokus har AnoxK™ 1 bärare jämförts med kulor av

PVA-gel. Slutsatsen där var att nitrifikationen per m^2 var jämförbar (Levstek och Plazl 2009).

En del studier har undersökt inverkan av biofilmens tjocklek på prestationen både direkt (Piculell m. fl. 2016; Torresi m. fl. 2016) och indirekt genom att undersöka den heterogena strukturen hos biofilmen (Okabe m. fl. 2002; Schramm m. fl. 1996; Horn och Hempel 1995). Det verkar finnas trender i hur nitrifikationen påverkas av tjockleken. En studie har visat på att ammoniumoxiderande bakterier (AOB) inte påverkas medan nitritoxiderande bakterier (NOB) hämmas i tunnare biofilmer när tjocklek mellan 200-500 μm undersökts (Piculell m. fl. 2016). Författarna betonar vikten av att fler undersökningar behöver göras på ämnet pga. komplexiteten och bristen på förståelse för hur tjockleken påverkar. En annan studie har uppnått fullständig nitrifikation i 50 μm biofilm (Torresi m. fl. 2016).

Torresi m. fl. (2016) har visat med labskaleförsök i en MBBR att nitrifikationen i en 50 μm biofilm är 3-4 ggr högre räknat per gram biomassa än i 200 och 400 μm tjocklek. Hastigheterna uttryckt per m^2 var jämförbara även om resultatet även där talade till den tunnare biofilmens fördel. I samma artikel påvisades även att en biofilm tjockare än 200 μm inte ökar nitrifikationshastigheten. Det sistnämnda överensstämmer även med resultaten av Piculell (2016) och vad Boltz m. fl. (2011) tidigare visat med en biofilmsmodell.

2.4.1 Bärardesign

Designen för konventionella bärare har gått ut på att skapa så mycket skyddad yta för biofilmen som möjligt. Det finns också en nyare typ av bärare som är designade för att kontrollera biofilmstjockleken (Welander och Piculell 2015). De är designade med en specifik vägghöjd för att biofilmen inte ska kunna växa obehindrat. Bärarna skrapar av varandra för att förhindra biofilm utanför vägghöjden. Dessa bärare ingår i AnoxK™ Zserie.

2.5 Förhållanden som påverkar nitrifierande biofilmer

Tillgängligheten av substrat och löst syre i en biofilm styrs av diffusion genom gränsskiktet och i biofilmen. Vilka faktorer som hämmar och förbättrar tillväxten har undersökts förr, och två faktorer som är i fokus i denna studien diskuteras nedan.

2.5.1 C:N-kvoten

C:N-kvoten har undersökts i flera sammanhang tidigare. Bassin m. fl. (2015) visade att mängden autotrofa bakterier ökade när kvoten minskade. Slutsatsen var att C:N-kvoten och ammoniumbelastningen var tongivande för bakteriesammansättningen. De kom också fram till att andelen autotrofa bakterier i biofilmen var proportionerlig mot den nitrifierande aktiviteten.

Hem m. fl. (1994) har fastställt att nitrifikation inte sker vid en belastning på över 5 mg biokemisk syreförbrukning (BOD_7) $\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ på bärare i en MBBR. Koncentrationen ammoniumkväve i inloppsvattnet var då 2-3 mg/l. Även om det inte går att översätta direkt till en kvot blir det tydligt att det finns en gräns i hur mycket kol som en bärare kan belastas med innan heterotrofer konkurrerar ut nitrifierare.

Piculell (2016) studerade nitrifikationen vid olika C:N-kvoter i MBBR:er. Vid en

C:N-kvot i inflödesvattnet på 2 tog heterotrofer över, men vid en kvot på 1 så nitrifierade bärarna. I detta fallet var allt COD biologiskt nedbrytbart COD (bCOD).

2.5.2 Löst syre

Nitrifikation kräver syre. Inte förvånande så har ett högt DO korrelerats mot höga nitrifikationshastigheter, både i labbskale-MBBR (Piculell m. fl. 2016) och IFAS (Sriwiriyarat m. fl. 2008). För en MBBR har Ødegaard m. fl. (1994) fått resultat som har tytt på att gränsen för någon nitrifikation är DO 2-3 mg/l.

Vid riktigt låga syrenivåer (0.5 mg/l) har Hanaki m. fl. (1990) visat att NOB inhibieras medan AOB är mer tåliga. Detta kan potentiellt ge en ackumulering av nitrit i processer med låg syrenivå.

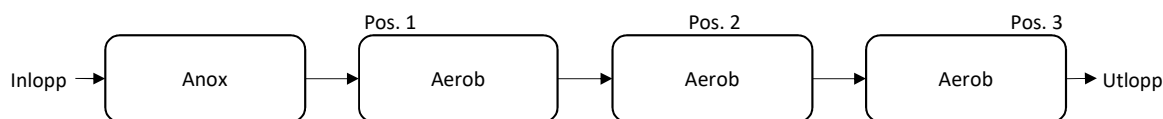
3 Metod

För att undersöka potentialen av olika bärare i en IFAS gjordes en försöksuppställning i en AS-bassäng. De olika bärarna undersöktes under ett par månader med nitrifikationstest, mikroskopering och bestämmande av biofilmsmassan. För att förutsäga vilka förhållanden som experimentet utfördes i modellerades scenariot upp i BioWin. Som referens undersöktes även bärare från en fullskalig IFAS.

3.1 Sjölunda

Försöken utfördes på Sjölunda avloppsreningsverk, ett reningsverk för kommunalt vatten i Malmö. Det försedimenterade vattnet delas bl.a. till den linje som kallas G2. Det är en AS där en fjärdedel är ickeluftad och de sista tre fjärdedelarna är luftade (DO=2 mg/l). Totalt är det fyra bassänger som är byggda för att ge plugflödeslik dynamik. Den luftade slamåldern är ungefär 1.5 dagar i genomsnitt, baserat på driftsdata. Grafik över G2 syns i Figur 1.

Samma inflödesvatten som går till G2 går även till GC (tidigare G3), en annan linje med samma volymer som G2, men som blivit ombyggd till en IFAS. Där är alla bassänger luftade och den andra bassängen fylld med K5 bärare. Slamstegen har DO 2 mg/l och bärarsteget har DO 4 mg/l. Belastningen är jämförbar med G2.



Figur 1: Den aktiva slamlinjen G2.

3.2 Experimentuppställning

Burar med olika bärare placerades i G2. Initialt placerades burar i början (position 1), i mitten (position 2) och i slutet (position 3) av den luftade zonen, se Figur 1. Varje bur hade en volym på 35 l uppdelat i två fack med intern luftning för omrörning. Varje fack fylldes med motsvarande 4 m² bärare. De bärartyper som användes var både en konventionell, K5 och flertalet tjockleksstyrda bärare. Alla bärare som användes presenteras i Tabell 1. Bilder på dessa ses i Figur 2. Vilka bärare som placerades i vilka burar och under vilken tidsperiod redovisas i Tabell 2.

Tabell 1: Information om bärare. De som kallas Z50 och Z1000 är prototyper.

Bärarnamn	Form	Vägghöjd [μm]
AnoxK™ 5	Cylinderformad med hål	NA
Prototype Z50	Mynt	50
AnoxK™ Z200	Sadel	200
AnoxK™ Z400	Sadel	400
Prototype Z1000	Mynt	1000



Figur 2: De bärare som använts i studien. Från vänster: K5, Z50, Z200, Z400, Z1000 (Magnus Lindén, 2020-01-08)

Studien började i juni 2019 men på grund av överväxta bärare spolades alla burar rena i augusti och luftningen av burarna ökades för att ge en bättre omrörning. Den 9:e oktober flyttades bur 1 till plats 3 och blev bur 3B med nya bärare eftersom den gamla placeringen i princip inte hade tillåtit någon biofilm att bildas. Samtidigt togs även Z1000 bort ur experimentet pga att den var igenväxt. Bärarna till bur 3B kom delvis från 2B och båda burarna fylldes på med oanvända bärare. Bur 3B läckte bärare från ena facket till det andra och fick plockas upp den 28 oktober för reparation. Bärarna fick spendera en dag i kylskåp. Även efter detta läckte det fortfarande och i slutet av försöket, den 30 november uppskattas 1/3 av Z50 ha läckt över till Z200:s fack. I Figur 3 finns bilder på burarna samt hur de placerades i reaktorn. För att ge en referensbild undersöktes också bärare från IFAS:en i GC.

Tabell 2: *Historik över experimentet. Samtliga buras sköljdes 2019-08-22*

Bur	Bärare	Startdatum
<i>2019-06-15 till 2019-10-09</i>		
Bur 1	K5, Z-400	2019-06-15
Bur 2A	K5, Z-400	2019-06-15
Bur 2B	Z-200, Z-50 & Z-1000 ¹	2019-06-15
Bur 3A	K5, Z-400	2019-06-15
<i>2019-10-09 till 2019-11-30</i>		
Bur 2A	K5, Z-400	oförändrad
Bur 2B	Z-200, Z-50	2019-10-09
Bur 3A	K5, Z-400	oförändrad
Bur 3B	Z-200, Z-50	2019-10-09



Figur 3: *Bilder på hur en bur ser ut samt hur de placerades. (Magnus Lindén, 2019-10-09)*

¹Z-50 och Z-1000 delade fack innan Z-1000 togs bort. Fyllnaden i m² före förändringen var lägre än 4 m²

3.3 Analys av bärare och biofilm

Löpande under experimentet hämtades bärare från experimentburarna till ett laboratorium för att undersöka utvecklingen av biofilmen. Bärare mikroskopades med både stereo- och ljusmikroskop. För att ta bilder med ljusmikroskopet skrapades biofilm av från bäraren. Utöver detta utfördes även experiment för att bestämma nitrifikationshastigheter och den totala biomassan i biofilmen.

Bilder med stereomikroskopet togs varje gång bärare hämtades för nitrifikationstester. Alla bilder med ljusmikroskopet togs 19:november. Biomassan bestämdes en gång den 25:e och 26:e november för alla bärare utom Z50 där den istället bestämdes den 2:e december.

3.3.1 Nitrifikationshastighet

För att utvärdera nitrifikationshastighet på de olika bärarna hämtades slumpmässigt utvalda bärare i omgångar för att testas i ett batchförsök i labbskala, se Figur 4. Bärare med motsvarande 0.3 m^2 lades i en reaktor med substrat innehållande ammoniumkväve tillsammans med fosfor och spårämnen. pH justerades till 7.5 med hjälp av tillsats av svavelsyra. DO och omrörning kontrollerades genom att variera mängden luft och kvävgas som pumpades in i reaktorerna. Det totala gasflödet på 1.5 l/min kontrollerades med rotametrar. I de försöken före 2019-10-13 kontrollerades inte syre eller omrörning. Samtliga försök gjordes med DO 4 mg/l och två försök med Z50 förlängdes med sänkt DO till 2 mg/l . Förhållandena i reaktorerna presenteras i Tabell 3.

När stabila förhållanden med avseende på DO uppnåtts i reaktorerna togs prover varje 15:e minut och analyserades för ammoniumkväve, nitrat och nitrit i en Thermo Scientific™ Gallery™ Plus discrete analyzer. En linjär regression på summan av nitrat och nitrit över tid gav nitrifikationshastigheten. Regressionen analyserades statistiskt med ett värde för förklarad varians (R^2). Efter försöken lades bärarna tillbaka till sin bur.

Tabell 3: Förhållanden i vilka batchförsöken genomfördes. Kemikaliekoncentrationerna syftar på initiala förhållandet

Koncentrationer		Förhållanden	
$NH_4^+ - N$	40 mg/l	Volym	1 l
$PO_3 - P$	3.8 mg/l	DO	$4 \pm 0.2 \text{ mg/l}$
$NaHCO_3$	2 g/l		$2 \pm 0.2 \text{ mg/l}$
Spårämnen ²		Gasflöde	1.5 l/min
		Temperatur	20 °C
		pH	7.5-8.0

²En komplett mix av behövda spårämnen användes.



Figur 4: Uppställningen som användes för att bestämma nitrifikationshastigheten (Magnus Lindén, 2019-11-20)

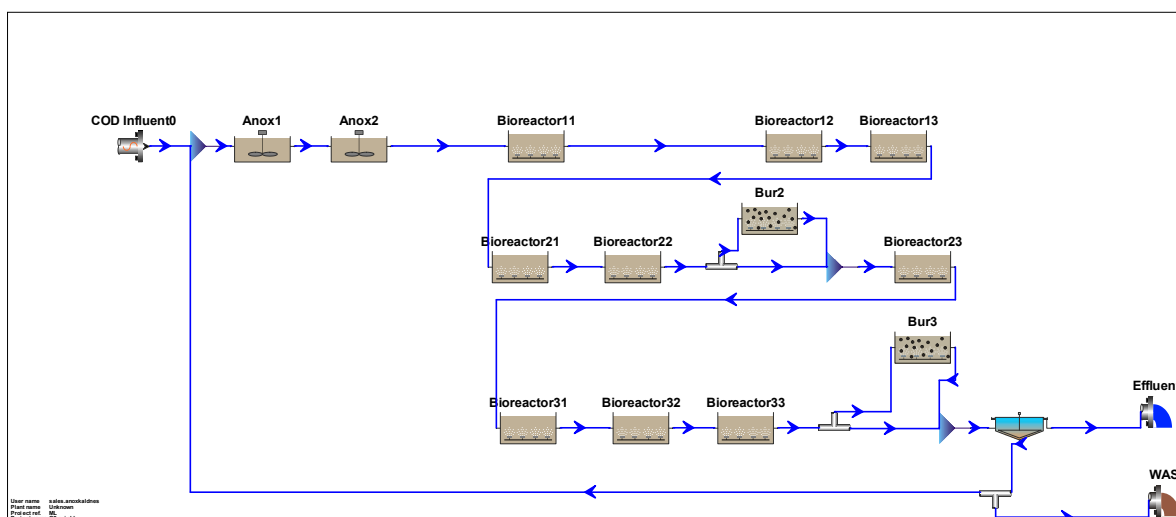
3.3.2 Biomassa i biofilmen

För att bestämma hur mycket biomassa som vuxit på de olika bärarna bestämdes torrvikten av biomassan. Metoden var som följer:

1. För Z50 vägdes torrvikten av aluminiumformarna som användes. De övriga vägdes inte.
2. Slumpmässigt valda bärare från alla burar torkades i aluminiumformar i torkskåp i mer än 24 h. 20 st Z50, 5 st av övriga.
3. Total torrsvikt vägdes.
4. Majoriteten av biofilmen skrapades bort med en borste och sedan placerades bärarna i 2 M NaOH i mer än 12 h.
5. Bärarna borstades och tvättades med rent vatten. Sedan placerades de i torkskåp i mer än 24 h.
6. Slutligen vägdes bärarna igen, och med Z50 även de tomma formarna. Biomassan bestämdes med skillnad i vikt.

3.4 Modell i BioWin

BioWin användes för att förutse vilka förhållanden experimentburarna utsattes för. Plugflödesdynamiken modellerades upp med 3 kontinuerligt omrörda tankreaktorer (CSTR) per reaktordel. Den anoxiska zonen modellerades som 2 CSTR:er. Burarna placerades där de befann sig i verkligheten. Volymerna på burarna är negligerbara jämfört med flödesbelastningen och därför kommer de inte att påverka koncentrationerna i modellen. En bild på uppställningen i BioWin presenteras i Figur 5.



Figur 5: Representation av AS-linjen G2 på Sjölunda ARV i BioWin.

3.4.1 Data från Sjölunda

Inflödeskoncentrationer till modellen bestämdes via data på tillgängliga flödesutjämnade dygnsprover från Sjölunda. För COD, total kvävekoncentration (TN) och total fosforkoncentration (TP) linjäriserades belastningen i kg/d till de dygn som saknade mätdata. Med hjälp av flödesdata räknades de sedan tillbaka till koncentrationer som varierade dygnsvis. Vid de tillfällen TP var lägre än 10 mg/l ansattes detta till 10 för att inte låta fosfor påverka utfallet av modellen. Data var tillgängligt för ca. 2-3 dygn/vecka. För nitrat linjäriserades koncentrationen direkt. Totalt Kjeldahl kväve (TKN) beräknas som differensen mellan TN och nitrat. Flödet som användes i modellen hade 1 h upplösning. Samtliga parametrar som användes sammanfattas i Tabell 4. För omvandling till tillståndsvariabler användes BioWins förinställda fraktionering för försedimenterat vatten. Genom hela simuleringen användes den uppmätta temperaturen på inloppsvattnet till reningsverket. Under försöksperioden i september till slutet av november föll temperaturen från ca. 20 °C till mellan 16 och 17 °C.

Tabell 4: *Sammanfattning av inflödesvattnet till modellen*

Medelvärde variabler			Konstanta inflödesvariabler		
Q_{in}	11064	$m^3 d^{-1}$	alk	7	$mmol/l$
COD	432	$mg l^{-1}$	ISS	45	$mg l^{-1}$
TKN	47	$mg l^{-1}$	Ca	80	$mg l^{-1}$
TP	10	$mg l^{-1}$	Mg	15	$mg l^{-1}$
NO_3-N	1	$mg l^{-1}$	DO	0	$mg l^{-1}$
			pH	7	

3.4.2 Verifikation av modell

För att bekräfta att modellen gav en bild av verkligheten jämfördes modellens TSS i reaktorn mot verklighetens under hela simuleringstiden. Under en dag togs också prover över tid på löst COD (sCOD) och NH_4-N längs bassängen för att kunna jämföra med de koncentrationer som beräknades fram i BioWin. sCOD analyserades med användningen av standard Hach Lange kit (LCK 814). NH_4-N analyserades på samma sätt som vid nitrifikationshastighetsförsöken.

3.4.3 Modell av biofilm

För att använda BioWin till att modellera beteendet hos en bärare med 400 μm biofilm modifierades modellens biofilmsparametrar. Målet var att nå en MCRT i biofilmen på 12.8 dagar, vilket ska räcka för att uppnå en nitrifierande biofilm vid en temperatur på 18-20 °C. Biofilmsdensiteten höjdes för att nå motsvarande 15 g/m^2 och *detachment rate* och *attachment rate* modifierades också för att nå rätt MCRT. För att tvinga ner tjockleken på biofilmen användes också BioWin:s parametrar *minimum Film Thickness* och *maximum Film Thickness*. Vilka siffror som användes redovisas i Tabell 5. DO i burarna sattes till 2 mg/l men en gång i veckan under modelleringen höjdes DO till 4 mg/l för att härma förhållandena i batchexperimentet. Under dessa höjningar hämtades resultatdata för nitrifikationshastigheter i biofilmen.

Tabell 5: *De inställningar som användes för att modellera en bärare med 400 μm biofilm i BioWin*

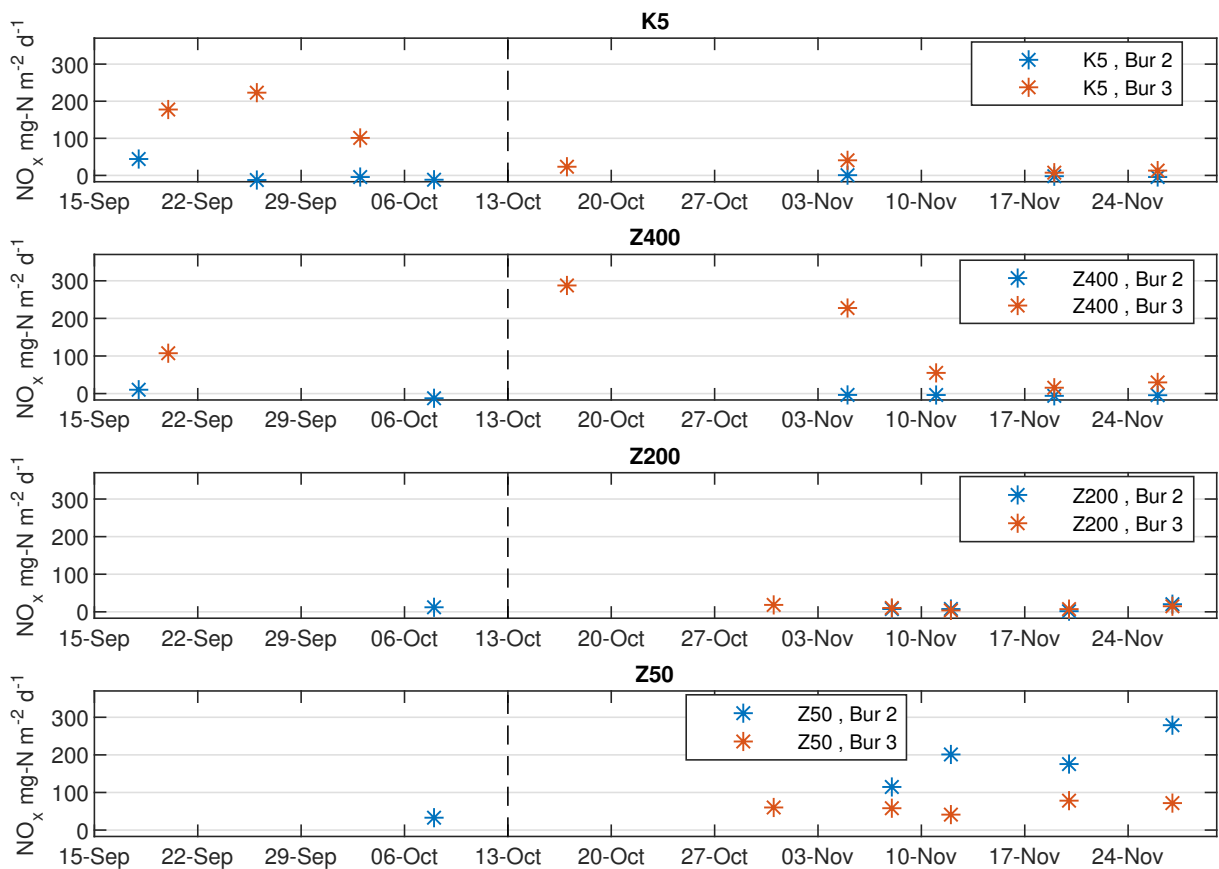
	Använda värden	Grundinställning	Enhet
Attachment rate	4.0	8.0	$gm^{-2}d^{-1}$
Detachment rate	938	8000	$gm^{-3}d^{-1}$
Thin film limit	0.1	0.5	mm
Thick film limit	0.3	3.0	mm
Max biomass concentrations / Grundinställning	2.7	1.0	1
Boundary Layer	80	100	μm

4 Resultat

4.1 Experiment

När biofilmen på bärarna fick växa fram uppstod trender bland bärarna. Nitrifikationshastigheterna presenteras i Figur 6. Resultaten från före 13 oktober har inte en kontrollerad syrenivå. Från figuren syns att de två bärarna i bur 3A, K5 och Z400 har i en period visat på nitrifierande förmåga, men den har senare avtagit. Z50 har i båda burarna en nitrifierande aktivitet men högre slutgiltiga hastigheter i bur 2B (279 mg-N m⁻² d⁻¹) än 3B (72 mg-N m⁻² d⁻¹). De övriga bärarna har inte uppvisat någon nitrifikation i testerna. Nitrifikationen av bärarna från GC analyserades på samma sätt 2019-12-11. Där blev resultatet 605 mg-N m⁻² d⁻¹.

Samtliga resultat över 20 mg-N m⁻² d⁻¹ har en förklarad varians på $R^2 \geq 0.97$.

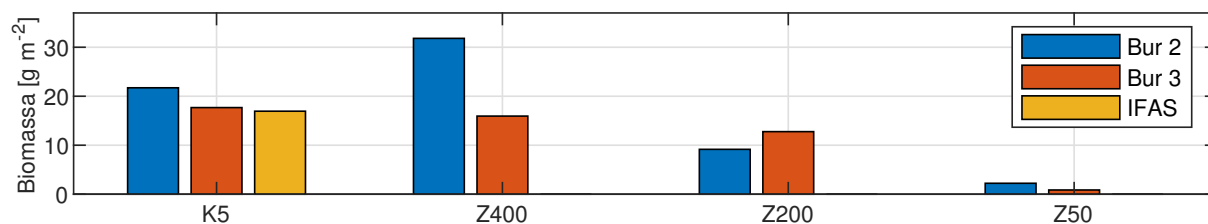


Figur 6: Nitrifikationsresultat från de olika burarna och bärarna över tid. Den sträckade linjen motsvarar tidpunkten då DO och omrörning började kontrolleras i försöken. Samtliga datapunkter på en hastighet över 20 mg-N hade en förklarad varians $R^2 \geq 0.97$

4.1.1 Biomassa och aktivitet på bärare

För att kontrollera hur mycket biofilm som hade bildats på de respektive bärarna bestämdes biomassan. Den presenteras i Figur 7. Trenden är att biomassan per m^2 är högre i placering 2 än 3, undantaget Z200. K5 från GC har en liknande biomassa som de från Bur 2A och 3A.

Även aktiviteten uttryckt per g biomassa beräknades för Z50 från experimentburarna och K5 från GC. Den presenteras i Tabell 6. Resultaten visar på att den inbördes skillnaden hos Z50 är mindre uttryckt per g än per m^2 och att de båda Z50 har en högre nitrifierande aktivitet än K5 från GC.



Figur 7: Bestämd biomassa på de respektive bärarna.

Tabell 6: Nitrifikationshastigheter omräknade per gram biomassa för Z50 från burarna och jämförelsevärde från GC IFAS.

Bur	Bärare	Biomassa [gm^{-2}]	Nitrifikation [$mgN m^{-2}d^{-1}$]	Nitrifikation [$mgN g^{-1}d^{-1}$]
2B	Z50	2	279	125
3B	Z50	1	72	83
IFAS	K5	17	605	36

4.1.2 Förändrad DO

Generellt så bildades främst nitrit i försöken på bärarna från burarna. I försöket med K5 från IFAS däremot hade fullständig nitrifikation skett. Dessa resultaten presenteras i Figur 8a, som nitritackumuleringshastighet över nitrifikationshastighet (som beräknas av summan av nitrit och nitrat), här jämförd med Z50 och olika DO. I Figur 8b presenteras resultatet från experimentet med sänkt DO, från 4 till 2 mg/l. Effekten från sänkningen har fallit olika ut på Z50 från 2B och 3B. I 2B sjönk hastigheten till ca. 1/3 medan i 3B halverades resultatet.

4.1.3 Mikroskopering

En sammanställning av mikroskoperade bilder finns i Tabell 7 och 8. Det visade sig att alla bärare fick tillväxt av ciliater. Endast Z50 visade på en förmåga att inte bli överväxta.

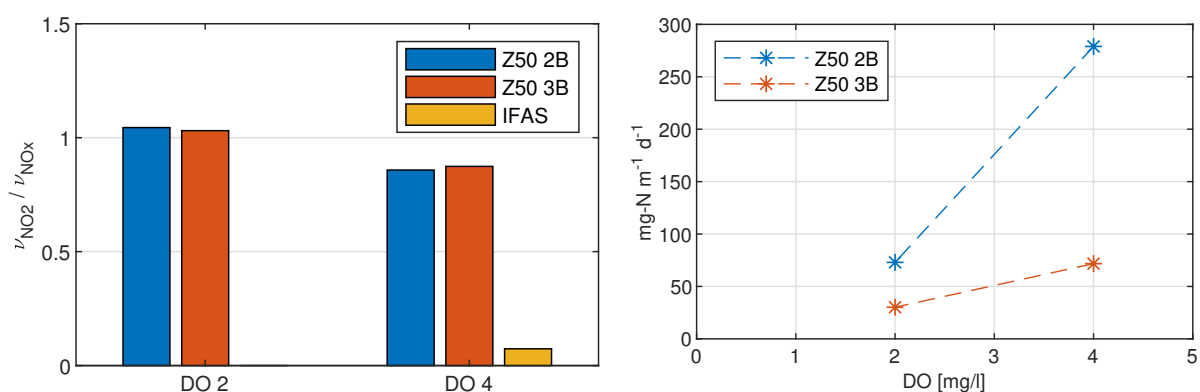
K5-bärarna har blivit fullständigt täckta av ciliater i båda positionerna. Ingen tydlig skillnad är synlig mellan burarna men eventuellt är bärarna i bur 3A lite luftigare än i bur 2A.

Z400 visade tecken på att ha utvecklat olika biofilmer vid mikroskopering. I oktober fanns en tydlig skillnad där bärarna i 3A var tydligt gulare än i den vita biofilmen hos bur 2A. En svag förändringstrend mot att biofilmen i 3A gick mot fler enstaka vita ciliatpartier går att se.

Z200 har visat sig vara något mindre täckt med ciliater än Z400, och i 2B finns tendenser till att ha en gul biofilm närmare kanterna. I bur 3B hos Z200 växte ciliater över vägghöjden.

Z50 bäraren skiljde sig från de övriga vad gäller ciliattäckning. Det är endast kring det något upphöjda krysset som ciliater har fått fäste. Vad som också syns på mikroskopbilderna är att en gul biofilm etableras under tiden för nitrifikationsförsöken. Från bilderna går också att se Z50 i bur 2B fick mera gul biofilm än i 3B, men mängden ciliater var till synes fler i bur 3B.

En bild på en K5 bärare från IFAS:en visas i Figur 9. Där syns att även den har en del ciliater, men är luftigare än de K5 bärare som vuxit i burarna. De bilder som tagits i ljusmikroskopet beräknar bilden av att det är ciliater som tagit över på många bärare. De visar också på en avsaknad av övriga mikrodjur bland försöksburarna. Bilder på biofilmen från IFAS:en visade istället på en mer varierad population mikrodjur.





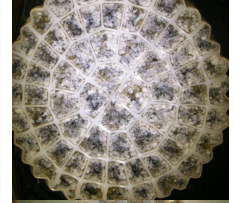

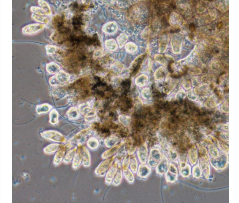
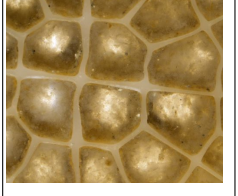



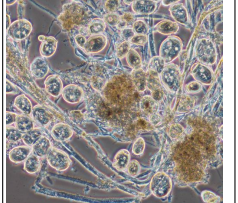


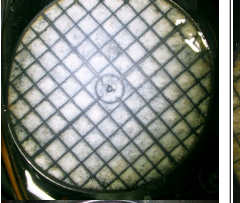

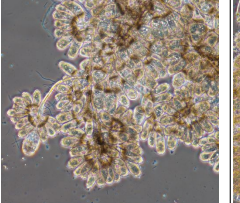
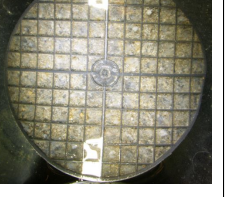

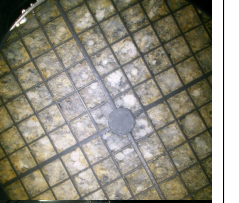

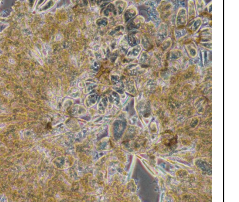
(a) Nitritackumuleringshastigheten över nitrifikationshastigheten (b) Hur DO påverkar nitrifikationshastigheten hos Z50

Figur 8: Hur DO påverkar nitrifikationsförsöken



Figur 9: Bild på K5 bärare från GC

Tabell 7: Bilder tagna på bärare från bur 2A och 3A i stereomikroskop under experimenttiden

2019-10-23	2019-11-05	2019-11-19	2019-11-26	2019-11-19	
					<p>2A K5: Bärarna är övertäckta av ciliater i alla steg. I ljusmikroskop syns täta bakterieflockar på ciliater.</p>
					<p>3A K5: Eventuellt är bärarna inte lika igensatta som i 2A. Ciliater dominerar även här.</p>
					<p>2A Z400: Tydligt täckt av ciliater i alla steg. Från ljusmikroskopet syns att ciliater har tillväxt av bakterier på sig, men inga fristående bakterieflockar syns.</p>
					<p>3A Z400: Bärarna är heltäckta av en gul biomassa. Eventuellt syns trenden att mer och mer vita ciliater kan urskiljas. I ljusmikroskop syns gula bakterier på ciliater.</p>

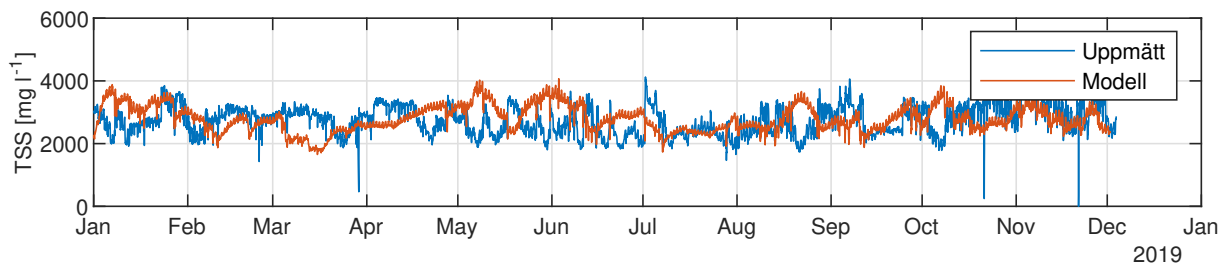
Tabell 8: Bilder tagna på bärare från bur 2B och 3B i stereomikroskop under experimenttiden

2019-10-23	2019-11-08	2019-11-20	2019-11-27	2019-11-20
<p>2B Z200: Här visas de nya bärarna. Det är möjligt att se ciliattillväxten över tid. De vita ciliaterna är omgivna av gul biomassa.</p>				
<p>3B Z200: Dessa bärare har blivit helt överväxta av ciliater. De är de enda bärarna som uppvisat ciliater utanför vägghöjden.</p>				
<p>2B Z50: Bärarna saknar nästan helt tillväxt av ciliater. De platser där de kan växa är kring högre skyddsvallar. Den fria ytan täcks delvis av gul biomassa. Bilden från ljusmikroskopet visar bakterieflockar och endast enstaka ciliater.</p>				
<p>3B Z50: Liknande mönster som Z50 i 2B återfinns här. Mängden ciliater är något fler och de partier med gul biomassa något mindre.</p>				

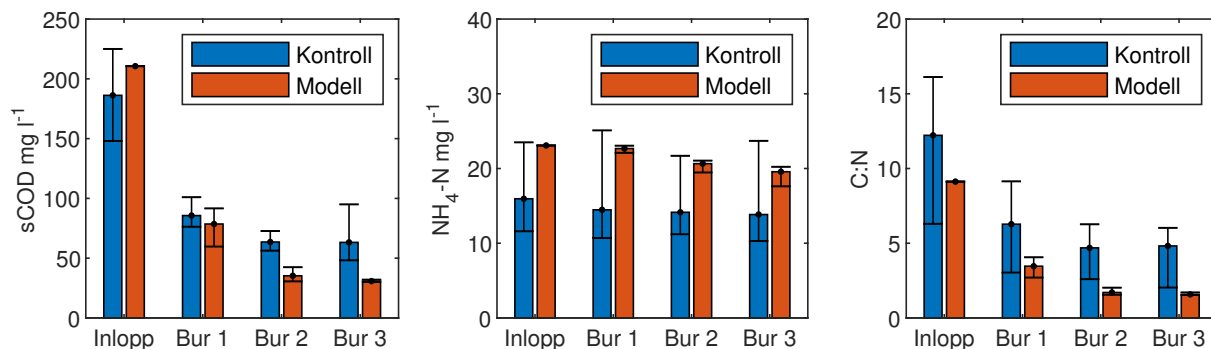
4.2 Modell

Modellen utvärderades och jämfördes med onlinemätningar. Uppmätt totalt suspenderat material (TSS) i reaktorn och modellerad TSS presenteras i Figur 10.

Under 30 oktober togs prover på bassängerna för att kunna jämföra med modellerade förhållanden. Jämförelsen visas i Figur 11. Vad gäller sCOD stämmer inloppet och placering 1 överens. Vid bur 2 och 3 ligger modellen under kontrollmätningen. Vad som observeras är att både modell och kontrollmätning har planat ut. Koncentrationen är samma vid bur 2 som 3. Vad gäller $\text{NH}_4\text{-N}$ förutser modellen i medeltal högre koncentrationer, men mönstret med fallande koncentrationer genom reaktorn är likt. Sammantaget ger detta en C:N-kvot som är konsekvent för låg i modellen för denna dag. Resultatet att både bur 2 och 3 utsätts för snarlik C:N-kvot återfinns både i kontrollmätningen och modellen.



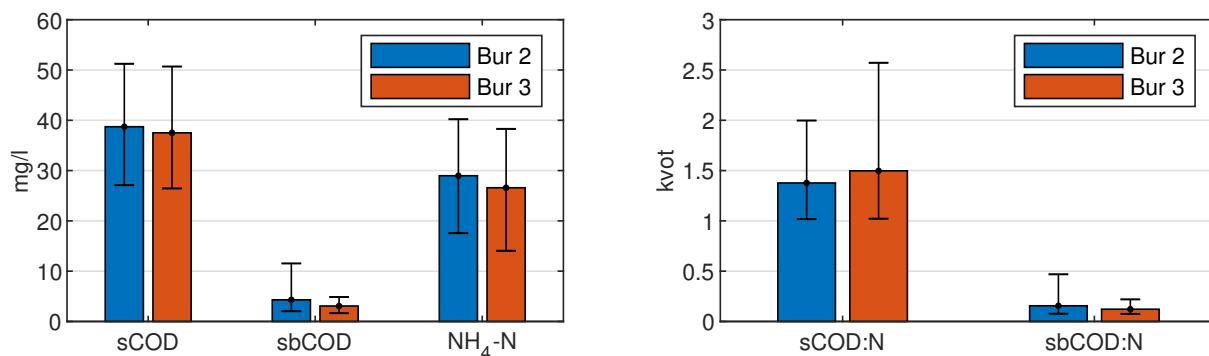
Figur 10: Översikt över hur TSS överensstämmer mellan modell och verklighet



Figur 11: Jämförelse mellan modell och verklighet under dagen 30-10-2019. Felstaplarna motsvarar 95:e percentilen

4.2.1 Förhållanden i burarna

För att estimerar vilka förhållanden burarna varit utsatta för avlästes modellens sCOD, löst biologiskt nedbrytbart COD (sbCOD) och $\text{NH}_4\text{-N}$. Resultaten presenteras i Figur 12. Det blir tydligt att skillnaden mellan bur 2 och 3 är liten. Det som skiljer mest är att sbCOD oftare är något högre i bur 2 än i bur 3. Detta återspeglas i sbCOD:N-kvoten.



Figur 12: Medelkoncentrationen som burarna varit utsatta för mellan 19 augusti-30 november enligt modelleringen. Felstaplarna motsvarar 95:e percentilen

4.2.2 Nitrifikation i biofilm

Den modellerade biofilmen i de olika burarna anpassades för att efterlikna en bärare med $400 \mu\text{m}$ biofilm. MCRT:n ställdes in för att tillåta nitrifierande bakterier. Resultaten från detta presenteras i Tabell 9. Modellen visar på en nitrifierande hastighet kring $30 \text{ mg-N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ i samma DO som vid batchförsöken. Det som gör att parametrar som biomassa och tjocklek skiljer är att de vuxit i olika vatten och därför bildat olika biofilm. I biofilmsmodellen hade heterotrof biomassa tagit över.

Tabell 9: Resultaten från modelleringen av biofilm

	Biomassa [gm^{-2}]	Tjocklek [mm]	MCRT [d]	Nitrifikation [$\text{mgN m}^{-2} \text{d}^{-1}$]	Nitrifikation [$\text{mgN g}^{-1} \text{d}^{-1}$]
Bur 2	14,9	0,4	12,7	27,5	1,9
Bur 3	14,3	0,4	12,2	35,0	2,5

5 Diskussion

5.1 Metoden

Den använda metoden gick ut på att ha en försöksuppställning för att utvärdera vid vilka C:N-kvoter som bärare kan nitrifiera i en IFAS. De flesta försöksburarna bedöms ha fungerat väl. I bur 1 blev det aldrig någon tillväxt av biofilm. Gissningsvis har detta berott på att syret har varit mycket låg i buren eftersom det har funnits stora mängder lättillgängligt kol. I bur 3B har Z200 fått tillväxt som sträcker sig över skyddsnetet. Detta är ett tecken på att omrörningen varit undermålig. Även Z50 i bur 3B har fått mer ciliater än motsvarande bärare i 2B, vilket stärker tesen att omrörningen varit för dålig i bur 3B. Troligen beror det på att luftningen varit för låg.

Mätningen av nitrifikationshastigheten började med att bärare hämtades slumpmässigt från försöksburarna. Där hämtades ca. 10 % av samtliga bärare. Hur representativa de var för hela populationen undersöktes aldrig. Den inbördes variationen i buren är en potentiell förklaring till en del av variationen från vecka till vecka i nitrifikationshastighet. Själva batchförsöken hade en hög förklarad varians vilket tyder på ett tillförlitligt resultat. Vad som också kan ha orsakat en variation mellan mätningarna är att olika DO-mätare användes, som kan ha varit kalibrerade något annorlunda. Som visat i försöket med lägre DO påverkar det mycket och i försöken kan DO ha varierat mellan 3.8 och 4.2 mg/l.

5.1.1 Modell

Resultatet i Figur 10 visar att modellen på det stora taget stämmer överens mot verkligheten. Eftersom den modellerade TSS ligger nära den uppmätta innebär det att MLSRT också kommer att stämma väl överens. I Figur 11 kan också ses att modellen ser ut att fånga det beteende som anläggningen uppvisar i verkligheten. Vid bur 2 ser det ut som att sCOD har planat ut. Den resterande fraktionen i både modellen och kontrollmätningen är förmodligen till största delen inert. Mönstret att $\text{NH}_4\text{-N}$ sjunker genom reaktorn syns i både modellen och kontrollmätningen.

Eftersom modellen är baserad på data där endast någon dag i veckan är tillgänglig kommer den heller aldrig att kunna förutsäga rätt alla dagar. Det visade sig i kontrollmätningen när $\text{NH}_4\text{-N}$ var konsekvent för högt i modellen för den specifika dagen. Men eftersom rätt typ av trender kan ses i kontrollmätningen bör modellen sett över en längre tid ha rätt, åtminstone i medeltal. Eftersom biofilmen växer till sig långsamt spelar det inte någon roll att modellen missar vissa förändringar. Modellen bedöms som tillräckligt korrekt för att beräkna vilka förhållanden som biofilmen i försöksburarna exponerats för.

5.1.2 Jämförelse med fullskalig IFAS

Jämförelsen mellan bärarna i försöksburarna och de från GC behöver göras med försiktighet. Inflödesvattnet till G2 och GC är det samma, men den koncentration som bärarna utsätts för kommer att skilja. Vilka sbCOD-koncentrationer som uppkommer hos bärarna i GC är inte utrett. Eftersom GC nitrifierar är det också uppenbart att mängden $\text{NH}_4\text{-N}$ kommer att vara avsevärt lägre i GC.

Vad som är klart är att den mängd nitrifierande bakterier som har vuxit fram

på bärarna i GC är tillräckligt för en fungerande nitrifierande process. Utan att veta hastigheten i verkligheten är en teoretisk hastighet vid 20 °C och DO 4 mg/l bestämd vilket kan betraktas som en jämförelsesiffra för de övriga bärarna. Det finns en osäkerhet i om de hämtade bärarna från GC är representativa. Detta undersöktes aldrig.

5.2 Nitrifikationshastigheter

De hastigheter som har uppmätts i burarna är generellt låga jämfört med den nitrifierande bäraren i GC. Baserat på mikroskopbilder är det troligt att det som sinkar nitrifikationen är det kraftiga tillväxten av ciliater. De bärare som har uppvisat stadigt ihållande nitrifikation är Z50. De är också de bärare som har visat sig förhindra tillväxt av ciliater. Baserat på var de enstaka ciliaterna fick fäste på Z50, är det rimligt att tro att den är en ren mekanisk effekt som har stoppat tillväxten på bärarna. Från nitrifikationsresultaten i Figur 6 går det att ana en stigande trend för Z50 i bur 2B. Det stämmer väl överens med att mer och mer av bärarna täckas med gul biofilm. Eftersom de inte heller är helt täckta i slutet av studien är det rimligt att tro den stigande trenden kommer att fortsätta. Ett liknande samband är rimligt att förvänta sig för Z50 i 3B eftersom det finns fri yta som ännu inte fått någon gul biofilm på bärarna. Den totala avsaknaden av nitrifikation på Z200 i position 3 och den låga tillväxthastigheten för Z50 i position 3 tros bero på den tidigare diskuterade dåliga omrörningen.

5.2.1 Aktivitet i biofilmen

Z50 har visat på en potential att skapa en specialiserad biomassa för nitrifikation (Tabell 6). Detta stämmer överens med tidigare studier (Torresi m. fl. 2016). Om hastigheten fortsätter att stiga per m² kan Z50 potentiellt komma att uppnå samma nitrifierande hastigheter som K5 från GC, men då utan att ha några mängder mikrodjur växandes. En intressant aspekt av detta är att det totala syrebehovet troligen kommer minska, eftersom färre heterotrofa organismer kommer att konkurrera om syret. Hur stor en sådan eventuell effekt är kan vara ämne för framtida studier. Vad som också är viktigt att komma ihåg är att det är inte nödvändigtvis dåligt att ha en viss mängd ciliater och mikrodjur. De kan förbättra sedimenteringsegenskaperna.

5.2.2 Nitrifikation i biofilmsmodellen

I metoden ansattes en MCRT i biofilmen för att tillåta nitrifikation vid 18-20 °C. I modellen användes en något lägre temperatur, som lägst 16 °C. Detta tros inte ha haft någon avgörande effekt, men kan ha påverkat utfallet från modellen.

Biofilmsmodellen har visat på låga nitrifierande hastigheter (Tabell 9). Resultaten är på det viset inte särskilt avvikande från vad Z400 resultaten från experimentet visade. I biofilmsmodellen dominerade heterotrof biomassa, vilket det också gjorde i verkligheten. BioWins modell beräknar alltså kraftig konkurrens från heterotrofer och därmed stämmer det att autotrofer knappt kan existera. Eftersom BioWin inte skiljer på heterotrof som i ciliat och i bakterie gör det troligen att BioWin hade överskattat vilken COD-reduktion bärarna är kapabla till. I det standardfall som BioWin är anpassat efter kommer inte ciliater uppta så stor del av den totala heterotrofa massan som den misstänks göra här i experimentet.

Att krympa biofilmen till en ännu tunnare, motsvarande en 50 μm biofilm hade troligen gjort förhållandena ännu mera homogena i biofilmen och lett till fortsatt heterotrof dominans. Det hade alltså troligen inte resulterat i mera nitrifikation vilket är vad vi såg i verkligheten.

Dessa resultaten tyder alltså på att den metod som användes i BioWin för att modellera biofilm inte fungerar i detta fallet. Huruvida det är metoden, det specialfall som modellerats eller biofilmsmodellen som är problemet lämnas osagt.

5.3 C:N-kvoten

C:N-kvoten är ett mått för att förutse konkurrensen mellan heterotrofer och autotrofer. Enligt modellen var de C:N-kvoter som bärarna utsattes för snarlika eftersom $\text{NH}_4\text{-N}$ beräknades falla ungefär lika mycket som sCOD mellan burarna (Figur 12). Vad som skiljer är att bur 2 oftare utsätts för en något högre belastning av sbCOD än bur 3. Den skillnaden skulle kunna vara en rimlig förklaring till att biomassan generellt var något högre hos bärarna i position 2 över position 3, som presenterades i Figur 7. Heterotrofer har potentiellt fått bättre fäste där tack vare mer tillgängligt COD.

De koncentrationer som beräknats fram motsvarar vad bärarna har upplevt och i en jämförelse med en CSTR motsvarar det utflödesvattnet. För en nitrifierande anläggning är det inte osannolikt att sbCOD är lågt, under 12 mg/l, på samma sätt som burarna blivit utsatta för. Dessutom är det COD som burarna har haft tillgängligt förmodligen det långsamt nedbrytbara. Vad gäller $\text{NH}_4\text{-N}$ är koncentrationerna (15-40 mg/l) förmodligen högre än vad en nitrifierande anläggning dimensioneras för, just eftersom $\text{NH}_4\text{-N}$ konsumeras vid nitrifikation. Sammantaget ger detta en för låg sbCOD:N-kvot för att vara realistisk. Istället för att fokusera på själva kvoten kan det därför vara lämpligt att istället fokusera på koncentrationen av sbCOD, och hävda att $\text{NH}_4\text{-N}$ har funnits i överskott. Här har experimentet visat att den koncentration som bur 2 utsatts för var mellan 2-12 mg/l. Det har inte varit inhiberande för nitrifikation, eftersom Z50 har nitrifierat där. Den här koncentrationen utgörs som nämns ovan troligtvis till största delen av långsamt nedbrytbart kol och det är rimligt att tro att resultatet hade kunnat vara något annat om heterotroferna haft tillgång till snabbt nedbrytbart kol i dessa koncentrationer. För en framtida studie bör burarna placeras så att de utsätts för ett högre bCOD. På så vis kan den inhiberande koncentrationen hittas. För att åsidosätta konkurrensen från ciliater och mikrodjur kan det vara lämpligt att använda Z50 vid ett sådant försök.

Bur 3 utsattes för en lägre sbCOD-belastning (1-5 mg/l). I teorin borde autotroferna i den ha varit utsatta för ett lägre konkurrensstryck och uppvisat mera nitrifikation. Att K5 och Z400 har nitrifierat i bur 3A men aldrig i bur 2A tyder på att detta stämmer. Nitrifierare är inte tillräckligt konkurrenskraftiga i position 2. Huruvida det är konkurrensen med heterotrofa bakterier eller ciliater och mikrodjur i position 3 som slår ut nitrifikationen förr eller senare går inte att säga baserat på denna studien. Vad som går att säga är att konkurrensen från endast heterotrofa bakterier inte räcker för att konkurrera ut nitrifierarna i position 2, eftersom Z50 har visat på en god nitrifierande förmåga där.

5.4 Ciliaternas utbredning

Ett antal trender har uppkommit i experimentet. En av de tydligaste är att ciliater har trivts mycket bra på bärarna. Eftersom den undersökta AS-anläggningen är högbelastad med en relativt kort MLSRT misstänks den vara under eller på gränsen till vad ciliater kan överleva i. Det stärks av bakgrunden med att ciliater ofta trivs i långa slamåldrar (Jansen m. fl. 2019). Det misstänks ha gjort att när en biofilm med avsevärt högre SRT är tillgänglig blir den perfekt grogrund för ciliater. De saknar konkurrens från den suspenderade fasen. Eftersom försöksburarna dessutom är mycket små i förhållande till den totala belastningen kommer de inte att påverka några koncentrationer i bassängerna. Ciliaterna kommer därför alltid att ha ett överskott på föda. Detta gör också hela experimentsenariot något osannolikt, eftersom vid en fullskaleanläggning med IFAS kommer troligen inte föda finnas i överskott, och ciliater kan inte dominera i samma utsträckning. I viss mån har referensbilder från GC (Figur 9) tillsammans med nitrifikationsförsöken visat att ciliater inte kan dominera lika mycket i en fullskala som i försöksburarna. För att bekräfta dessa teorierna om varför ciliater tagit över hade en undersökning av slammet med kvantifiering av mikrodjur samt en mer djupgående mikrobiell analys av bärarna varit nödvändig.

5.5 Nitritbildning och sänkt DO

Vad gäller nitritbildningen finns tecken på att AOB:er finns i överskott på Z50 (Figur 8a). Vid sänkningen av DO till 2 mg/l blir nitratbildningen obefintlig. Det ligger i linje med Hanaki m. fl. (1990) resultat. Eftersom detta försök med 2 mg/l är i en diffusionsbegränsad biofilmsprocess kan det misstänkas ligga nära deras värden på 0.5 mg/l som visades vara inhiberande för NOB:er i ett suspenderat system. Det finns många möjliga orsaker till att nitrit bildades i överskott. Eftersom de bärare som vuxit fram i försöksburarna haft en syrehalt på DO 2 mg/l är det en tänkbar anledning. Den kanske mest troliga anledningen är att eftersom försöksburarna inte påverkade totalkoncentrationen nitrit i G2 är det troligt att även det har hämmat bildandet av NOB:er. Eftersom nitritöverskottet uppkom i alla försöksburarna tros inte tjockleken på biofilmen ha påverkat nämnvärt.

Bärarna från IFAS:en nitrifierade fullständigt. De anledningar som lyftes fram som hämmande för AOB:er existerar inte i fullskaleanläggningen. De har vuxit fram i 4 mg/l syre och bärarna påverkar i allra högsta grad nitritkoncentrationen i reaktorn.

Hur sänkningen av DO från 4 till 2 mg/l i batchförsöken påverkade nitrifikationshastigheten för Z50 presenterades i Figur 8b. Sänkningen resulterade i en kraftigare skillnad för Z50 i bur 2B än i 3B. Det skulle kunna bero på att den tjockare biofilmen i 2B kan bli mer penetrerad vid högre DO (och därmed aktivera fler bakterier), medan den tunnare i 3B blir fullt penetrerad redan vid DO 2 mg/l.

6 Slutsats

Metoden har inte kunnat visa på vilka förhållanden som krävs för eller inhiberar nitrifikation. De förhållanden som burarna utsattes för gav en god grogrund för ciliater, något som tros vara anledningen till i princip avsaknad av nitrifikation hos samtliga bärare utom Z50. Huruvida det hade varit ett problem i en fullskaleapplikation är inte utrett.

C:N-kvoten var lik mellan de båda burarna, och den som utsattes för något högre kvot borde i teorin ha haft lägre hastigheter, men resultaten från Z50 visade att den i bur 2 nitrifierade mer. En anledning tros vara att det har varit problem med försöksbur 3B. Att kvoten faktiskt var något högre vid den andra platsen tros vara anledningen att något mera biomassa bildats där.

Metoden som användes i BioWin ger en biofilm med mycket heterotrof biomassa, vilket gav relativt låg nitrifikationshastighet för en 400 μm biofilm. MCRT i biofilmen tillät i teorin nitrifikation. Slutsatsen är att den metod som användes i BioWin inte fungerar speciellt väl för att förutse beteendet hos biofilmer.

Effekten av DO undersöktes begränsat. Denna studie visade på samma samband som flera tidigare studier att nitrifikationshastigheten ökade med högre DO. Resultaten antydde även att en så tunn biofilm som 50 μm inte nödvändigtvis blir fullt penetrerad vid DO 2 mg/l.

Nitrifikationshastigheterna i experimenten var låga relativt med den jämförda fullskaleanläggningen, men troligtvis fortfarande stigande på Z50. Resultaten visar på en stor potential att använda Z50 för att odla en specialiserad nitrifierande biomassa. En teori är att det totala syrebehovet hade minskat med en sådan biomassa, men potentiellt försämrat slammets sedimenteringsegenskaper. Eventuellt kommer det också vara ett överskott på AOB:er även i en fullskaleanläggning med Z50, men det finns mycket som tyder på att resultaten här uppkom genom omständigheter i försöket. Trots allt så finns det en anledning att tro att Z50 kan ha en roll i framtidens effektivare och kompaktare avloppsvattenrening.

6.1 Framtida studier

En av sakerna som studien försökte utvärdera var den C:N-kvot och därmed COD-belastning där nitrifikation inte längre var möjlig. Med facit i hand så uppkom nitrifikation även vid den högst belastade punkten. En vidare studie på detta med att höjd belastning hade kunnat hitta punkten där inte längre nitrifikation är möjlig.

En av de intressantare aspekterna i den här studien har varit möjligheten att använda Z50 för att skapa en specialiserad biomassa, fri från mikrodjur. En framtida studie bör ta reda på om den kan nå samma ythastighet som en tjockare biofilm även i en IFAS, på samma sätt som den gjorde i en tidigare studie på en MBBR (Torresi m. fl. 2016). En jämförelse av syreförbrukningen för att testa teorin om att den tunnare biofilmen kan utnyttja syre effektivare hade också varit intressant. För att undersöka dessa aspekterna hade ett lämpligt alternativ varit att placera burar med olika bärare i en befintlig IFAS. Då hade troligen problemet med överdriven ciliattillväxt försvunnit och gett möjligheten att skapa en bra referensbild från en fungerande fullskalanläggning. På så vis kan det också studeras huruvida AOB:er fortsätter finnas i överskott på Z50 i en IFAS.

En annan intressant aspekt i denna studien har varit anledningen till att ciliater trivts så bra. För att utvärdera de teorier om varför hade en undersökning av slam och slamåldrar varit mycket intressant.

Referenser

- Bassin, JP, B Abbas, CLS Vilela, R Kleerebezem, G Muyzer, AS Rosado, MCM Van Loosdrecht och M Dezotti (2015). "Tracking the dynamics of heterotrophs and nitrifiers in moving-bed biofilm reactors operated at different COD/N ratios". I: *Bioresource technology* 192, s. 131–141.
- Boltz, JP, E Morgenroth, D Brockmann, C Bott, WJ Gellner och PA Vanrolleghem (2011). "Systematic evaluation of biofilm models for engineering practice: components and critical assumptions". I: *Water Science and Technology* 64.4, s. 930–944.
- Hanaki, Keisuke, Chalermraj Wantawin och Shinichiro Ohgaki (1990). "Nitrification at low levels of dissolved oxygen with and without organic loading in a suspended-growth reactor". I: *Water research* 24.3, s. 297–302.
- Hem, Lars J, Bjorn Rusten och Hallvard Ødegaard (1994). "Nitrification in a moving bed biofilm reactor". I: *Water Research* 28.6, s. 1425–1433.
- Horn, H och DC Hempel (1995). "Mass transfer coefficients for an autotrophic and a heterotrophic biofilm system". I: *Water Science and Technology* 32.8, s. 199–204.
- Jansen, Jes la Cour, Erik Arvin, Mogens Henze och Poul Harremoes (2019). *Wastewater Treatment: Biological and Chemical Processes*. 4:e. Polyteknisk Forlag, s. 60.
- Levstek, Meta och Igor Plazl (2009). "Influence of carrier type on nitrification in the moving-bed biofilm process". I: *Water science and technology* 59.5, s. 875–882.
- Moretti, P, JM Choubert, JP Canler, O Petrimaux, Pierre Buffière och P Lessard (2015). "Understanding the contribution of biofilm in an integrated fixed-film-activated sludge system (IFAS) designed for nitrogen removal". I: *Water Science and Technology* 71.10, s. 1500–1506.
- Okabe, S, H Naitoh, H Satoh och Y Watanabe (2002). "Structure and function of nitrifying biofilms as determined by molecular techniques and the use of microelectrodes". I: *Water Science and Technology* 46.1-2, s. 233–241.
- Orantes, Julio C och Simón González-Martínez (2004). "A new low-cost biofilm carrier for the treatment of municipal wastewater in a moving bed reactor". I: *Water science and technology* 48.11-12, s. 243–250.
- Piculell, Maria (2016). "New Dimensions of Moving Bed Biofilm Carriers: Influence of biofilm thickness and control possibilities". Diss. Water och Environmental Engineering, Department of Chemical Engineering, Lund University.
- Piculell, Maria, Pia Welander, Karin Jönsson och Thomas Welander (2016). "Evaluating the effect of biofilm thickness on nitrification in moving bed biofilm reactors". I: *Environmental technology* 37.6, s. 732–743.
- Schramm, Andreas, Lars Hauer Larsen, Niels Peter Revsbech, Niels Birger Ramsing, Rudolf Amann och Karl-Heinz Schleifer (1996). "Structure and function of a nitrifying biofilm as determined by in situ hybridization and the use of microelectrodes." I: *Appl. Environ. Microbiol.* 62.12, s. 4641–4647.
- Sriwiriyarat, Tongchai, Wiyaporn Ungkurarate, Prayoon Fongsatitkul och Sopa Chinwetkitvanich (2008). "Effects of dissolved oxygen on biological nitrogen removal in integrated fixed film activated sludge (IFAS) wastewater treatment process". I: *Journal of Environmental Science and Health, Part A* 43.5, s. 518–527.
- Torresi, Elena, S Jane Fowler, Fabio Polesel, Kai Bester, Henrik R Andersen, Barth F Smets, Benedek Gy Plosz och Magnus Christensson (2016). "Biofilm Thickness Influences

- Biodiversity in Nitrifying MBBRs - Implications on Micropollutant Removal". I: *Environmental science & technology* 50.17, s. 9279–9288.
- Welandar, Thomas och Maria Piculell (2015). *Free-flowing carrier elements*. (Patentansökan) Publikationsnummer: WO 2015082349 A1.
- Ødegaard, Hallvard, Birgitte Gisvold och Jonathan Strickland (2000). "The influence of carrier size and shape in the moving bed biofilm process". I: *Water Science and Technology* 41.4-5, s. 383–391.
- Ødegaard, Hallvard, B Rusten och T Westrum (1994). "A new moving bed biofilm reactor-applications and results". I: *Water Science and Technology* 29.10-11, s. 157.

Bilaga: Hur ska vi få bakterier att rena vårt vatten? - *Populärvetenskaplig sammanfattning*

För att livet ska kunna fortsätta i våra sjöar och hav behöver vi vara försiktiga med vad vi släpper ut från vårt samhälle. En viktig del i detta kommer från vattnet vi använder i våra hem. Allt det vattnet passerar ett avloppsreningsverk för att det ska bli harmlöst för den sjö, å eller det hav som tar emot det använda vattnet. Det finns två beståndsdelar som är extra viktiga att rena i avloppsvatten, det är kol och kväve. Kålet är vad man brukar kalla syrekonsumerande. Det betyder att när det släpps ut i havet använder bakterier allt det tillgängliga syret för att kunna äta eller bryta ner kålet. Det gör så att allt syre kan försvinna och det kan t.ex. bildas döda bottnar, som har skett mycket i Östersjön. Kväve är ett näringsämne som finns i vårt urin. När det kommer ut i öppet vatten gör det ofta att alger växer till. Eftersom alger också består av kol kan de också orsaka bottendöd.

Ett vanligt sätt att rena kol från avloppsvatten är att ha en bassäng med bakterier fritt flytandes där det trycks in luft. En sådan luftad bassäng kallas en aktivslam. I en aktivslam kan bakterierna bryta ner allt kol så att det försvinner från vattnet före det lämnar avloppsreningsverket. Det finns också bakterier som kan rena kväve. Men de bakterierna växer hellre som ett täcke på ett material, i det som kallas en biofilm, än fritt i en bassäng. Genom att tillsätta plastbrickor lite större än en femkrona som får flyta runt i bassängen bildas en tillväxtyta där kväve-nedbrytande bakterier kan bildas. Dessa plastbrickor kallas bärare. Att blanda en processen med fria bakterier och bärare kallas IFAS vilket är förkortning för Integrated Fixed film Activated Sludge. Vissa bärare har en speciell design vilket innebär att de kan styra vilken tjocklek biofilmen får.

En av svårigheterna med en IFAS är att kol-nedbrytande bakterier också kan bildas på bärarna och konkurrera ut de kväve-nedbrytande bakterierna. Vi hade som mål att undersöka hur olika mycket kol och kväve i vattnet och biofilmstjockleken påverkade konkurrenssituationen på bärarna. Resultatet visade oväntat nog att på alla bärare utom den med tunnast biofilm hade båda bakterietyperna konkurrerats ut av en helt annan organism, ett mikrodjur. Det var ett djur som heter ciliat och bara består av en enda cell. Det är vanligt att ciliater finns i viss mån på bärare men anledningen att de trivdes så bra tros ha berott på det experiment som sattes upp. Vad som visade sig intressant i experimentet var att den tunnaste biofilmen inte fick några ciliater alls, utan där kunde konkurrensen mellan kol- och kvävenedbrytande bakterier studeras. Sammantaget kunde studien visa att en väldigt tunn biofilm kan vara effektivare än en tjockare. På så vis behöver inte önskade bakterier ha konkurrens med några mikrodjur. Då kan avloppsvattenreningen bli bättre för att säkra våra sjöar och hav, även i framtiden.