

# Biologisk fosfor- avskiljning i Sverige

– Uppstart och drift

*Jes la Cour Jansen*

*Erik Särner*

*Eva Tykesson*

*Karin Jönsson*

*Lars-Erik Jönsson*





## Svenskt Vatten Utveckling

Svenskt Vatten Utveckling (SV-Utveckling) är kommunernas eget FoU-program om kommunal VA-teknik. Programmet finansieras i sin helhet av kommunerna, vilket är unikt på så sätt att statliga medel tidigare alltid använts för denna typ av verksamhet.

SV-Utveckling (fd VA-Forsk) initierades gemensamt av Svenska Kommunförbundet och Svenskt Vatten. Verksamheten påbörjades år 1990. Programmet lägger tonvikten på tillämpad forskning och utveckling inom det kommunala VA-området. Projekt bedrivs inom hela det VA-tekniska fältet under huvudrubrikerna:

Dricksvatten  
Ledningsnät  
Avloppsvatten  
Ekonomi och organisation  
Utbildning och information

SV-Utveckling styrs av en kommitté, som utses av styrelsen för Svenskt Vatten AB. För närvarande har kommittén följande sammansättning:

Anders Lago, ordförande	Södertälje Kommun
Olof Bergstedt	Göteborg Vatten
Lena Söderberg	Svenskt Vatten AB
Per Fåhraeus	Varbergs Kommun
Carina Färm	Eskilstuna Energi & Miljö AB
Daniel Hellström	Svenskt Vatten AB
Mikael Medelberg	Roslagsvatten AB
Marie Nordkvist Persson	Sydvatten AB
Lars-Gunnar Reinius	Stockholm Vatten AB
Bo Rutberg	Sveriges Kommuner och Landsting
Ulf Thysell	VA SYD
Susann Wennmalm	Käppalaförbundet
Fred Ivar Aasand	Norsk Vann, adjungerad

Författarna är ensamma ansvariga för rapportens innehåll, varför detta ej kan åberopas såsom representerande Svenskt Vattens ståndpunkt.

Svenskt Vatten Utveckling  
Svenskt Vatten AB  
Box 47 607  
117 94 Stockholm  
Tfn 08-506 002 00  
Fax 08-506 002 10  
svensktvatten@svensktvatten.se  
www.svensktvatten.se

*Svenskt Vatten AB är servicebolag till föreningen Svenskt Vatten.*

<b>Rapportens titel:</b>	Biologisk fosforavskiljning i Sverige – Uppstart och drift
<b>Title of the report:</b>	Biological phosphorous removal in Sweden – Start-up and operation
<b>Rapportnummer:</b>	2009-08
<b>Författare:</b>	Jes la Cour Jansen, Erik Särner, Eva Tykesson och Karin Jönsson, Vattenförsörjnings- och Avloppsteknik, Institutionen för Kemiteknik, Lunds Tekniska Högskola; Lars-Erik Jönsson, Öresundsverket, Helsingborgs Stad
<b>Projektnummer:</b>	22-131
<b>Projektets namn:</b>	Biologisk fosforavskiljning i Sverige – Uppstart och drift
<b>Projektets finansiering:</b>	Svenskt Vatten Utveckling
<b>Rapportens omfattning</b>	
<b>Sidantal:</b>	36
<b>Format:</b>	A4
<b>Sökord:</b>	Biologisk fosforavskiljning, slamhydrolys, driftsoptimering
<b>Keywords:</b>	Biological phosphorus removal, sludge hydrolysis, operational optimisation
<b>Sammandrag:</b>	Strikta utsläppskrav i Sverige betyder att biologisk fosforavskiljning ofta behöver kombineras med kemisk fällning. Uppstart och drift av bio-P-processen kan optimeras om kemisk fällning hålls på en nivå där tillgänglig fosfor motsvarar tillgänglig VFA. Vid brist på VFA kan intern hydrolys av biologiskt slam vara en tillgång.
<b>Abstract:</b>	The strict discharge requirements in Sweden mean that bio-P often needs to be combined with chemical precipitation. Start-up and operation can be optimised if chemical precipitation is kept at a level where the available P matches the available VFA. In case of VFA deficiency hydrolysis of sludge can be a valuable supply.
<b>Målgrupper:</b>	Svenska reningsverk, konsulter, leverantörer, forskare
<b>Omslagsbild:</b>	Öresundsverket i Helsingborg. Sveriges första reningsverk med bio-P helt utan tillsats av fällningskemikalier. Foto: Joakim Karlsson, JKF Photo.
<b>Rapport:</b>	Finns att hämta hem som PDF-fil från Svenskt Vattens hemsida <a href="http://www.svensktvatten.se">www.svensktvatten.se</a>
<b>Utgivningsår:</b>	2009
<b>Utgivare:</b>	Svenskt Vatten AB © Svenskt Vatten AB

## Förord

År 2003 startades ett nationellt bio-P-nätverk för att öka erfarenhetsutbytet om bio-P-processen. Nätverket består av omkring 20 kommuner i Sverige där man använder biologisk fosforrening på avloppsreningsverken för att minska användningen av fällningskemikalier; men intresset för biologisk fosforrening som ett alternativ till kemisk fosforrening inom avloppsvattenrening ökar stadigt i Sverige. För att öka kunskapen om biologisk fosforavskiljning och som stöd för nätverkets medlemmar har det i perioden efter 2003 sökts medel från VA-Forsk (nu Svenskt Vatten Utveckling) till specifika forsknings- och utvecklingsprojekt. Vattenförsörjnings- och avloppsteknik i Lund har varit drivande i forskningsarbetet; men projekten är genomförda med deltagande av reningsverk och personal därifrån. Genom de årliga träffarna inom nätverket har nya idéer tagits fram och arbetet har löpande kunnat utvärderas och justeras.

Detta projekt om uppstart och drift av bio-P-anläggningar har drivits av VA-teknik i Lund tillsammans med Öresundsverket i Helsingborg, Källbyverket i Lund och Käppalaverket i Stockholm. Projektet har finansierats av VA-Forsk och av Lunds Tekniska Högskola genom ett doktorandarbete. De medverkande verken har naturligtvis också bidragit betydligt till finansieringen av aktiviteterna.

Lund augusti 2009

*Jes la Cour Jansen*  
Lunds Tekniska Högskola



# Innehåll

Förord .....	3
Sammanfattning .....	6
Summary .....	7
1 Inledning .....	8
2 Projektets syfte och genomförande .....	10
3 Biologisk fosforavskiljning i kombination med kemisk fällning .....	12
4 Mätning av bio-P-aktivitet på anläggningar med kombinerad bio-P och kemisk fällning .....	14
5 Kemisk fällning och bio-P .....	17
6 Uppstart och drift av anläggningar med kombinerad bio-P och kemfällning .....	21
7 Hydrolys av returslam – försök vid Källby avloppsreningsverk .....	26
8 Slutsatser .....	34
9 Referenser .....	35

# Sammanfattning

Den andra fasen av ett projekt om uppstart och drift av avloppsreningsverk med biologisk fosforavskiljning innefattar en undersökning kring metoder för uppstart och drift av bio-P-anläggningar i kombination med kemisk fällning samt en utvärdering av intern produktion av VFA för bio-P-drift genom hydrolys av bioslam.

I Sverige är utsläppskraven vad gäller fosfor mycket stränga sett i ett internationellt perspektiv och långtgående kemisk fällning används på nästan alla reningsverk. Införande och drift av biologisk fosforavskiljning (bio-P) på sådana verk är inte en lätt uppgift. Under uppstart begränsar den kemiska fällningen den nödvändiga fosfor som är tillgänglig för bio-P-bakterierna och på grund av de stränga utsläppskraven är enbart bio-P sällan tillräckligt. Kombinationer av biologisk och kemisk fällning är därför den typiska lösningen. Dessutom finns sällan tillräcklig mängd VFA för optimal drift av en bio-P-process tillgänglig och det är därför nödvändigt att förse processen med extra VFA, antingen från en extern källa eller producerad internt på verket.

Vid kombinerad kemisk och biologisk fosforavskiljning måste två olika typer av konkurrens beaktas. För det första konkurrerar de två processerna om fosfor och för det andra konkurrerar bio-P-bakterier och glykogenackumulerande bakterier (som tar upp och lagrar VFA utan att involvera fosfor) om VFA.

I de fall då en existerande anläggning med kemisk fällning ska ställas om till bio-P-drift måste de två typerna av konkurrens balanseras mot varandra. Reducerad kemisk fällning måste följas av införandet av bio-P-förhållanden på ett sätt som gör att den tillgängliga mängden fosfor matchar den tillgängliga mängden VFA så att bio-P-bakterierna tillåts växa optimalt utan att extra VFA finns tillgänglig för glykogenackumulerande bakterier.

Vid drift av kombinerad kemisk fällning och bio-P gäller samma principer. Dosering av kemikalier bör reduceras så mycket som möjligt och hållas på en låg nivå där fosfor är tillgänglig för bio-P-bakterierna i en sådan mängd att all tillgänglig VFA förbrukas. Denna strategi har visats vara framgångsrik för att hantera perioder med låga VFA-halter i inflödet under industrisemestern och perioder med kraftig nederbörd och ökat flöde då den interna produktionen av VFA i primärslamshydrolysen reducerats.

Vid biologisk rening omvandlas komplexa organiska föreningar till mer lättnedbrytbara föreningar. Denna så kallade hydrolysisprocess sker i den biologiska processens alla delar under anaeroba, anoxa och aeroba förhållanden. De bildade lättnedbrytbara organiska föreningarna används för bland annat biologisk fosforavskiljning och för denitrifikation. Oftast innehåller kommunalt avloppsvatten en alltför låg halt lättnedbrytbara organiska ämnen för att t.ex. en process för biologisk fosforavskiljning ska kunna drivas effektivt. Möjligheter finns då att utnyttja det överskottsslam som bildas vid reningsverket för att producera lättnedbrytbara organiska föreningar och flyktiga fettsyror. System med hydrolys av returslam i en aktivtslamanläggning har med framgång använts och försök i fullskala vid Källby avloppsreningsverk i Lund har visat att avsevärda besparingar i kemikaliekostnader kan uppnås.

## Summary

The second phase of a project on start-up and operation of wastewater treatment plants with biological phosphorous removal comprises an examination of methods for start-up and operation of bio-P plants in combination with chemical precipitation and an evaluation of internal production of VFA for bio-P operation through hydrolysis of biological sludge.

In Sweden the phosphorous discharge limits are very stringent in an international perspective and advanced chemical precipitation is used at almost all plants. Introduction and operation of biological phosphorous removal (bio-P) at such plants is not an easy task. During the start-up the chemical precipitation limits the necessary phosphorus available for the bio-P bacteria and due to the strict standards bio-P is seldom sufficient alone. Combination of biological and chemical phosphorus removal is therefore the typical solution. Further, sufficient VFA for an optimal bio-P process is seldom available and it is necessary to provide extra VFA, either external or produced internal.

In combined chemical and biological phosphorus removal two different types of competition are necessary to consider. The two processes compete for the phosphorus and bio-P bacteria and glycogen accumulating bacteria (takes up and store VFA without including P) compete for the VFA.

In cases where an existing plant with chemical precipitation has to be changed for bio-P the two types of competition needs to be balanced. Reduction in precipitation shall be followed by introduction of bio-P conditions in a way so the phosphorous available match the available VFA letting the bio-P bacteria grow optimally without having extra VFA for the glycogen accumulating bacteria.

In operation of combined chemical precipitation and bio-P the same principles apply. Dosing of chemicals should be reduced as much as possible and kept at a level where phosphorus is available for the bio-P bacteria to use all the available VFA. This strategy has been shown to be successful for handling periods with low incoming VFA due to industry holiday break and for periods with heavy rain where the internal production of VFA from hydrolysis of primary sludge is reduced.

In the biological processes in wastewater treatment complex organic substances are degraded through hydrolyses into smaller substances that easily can be taken up by the bacteria. Hydrolysis takes place in the plant under aerobic, anoxic and anaerobic conditions. The degraded substances are specially needed for biological phosphorous removal. Very often there is a lack of these substances for an optimal phosphorous removal in the incoming wastewater and one possibility for internal production is to produce the substances through hydrolysis of biological sludge under anoxic or anaerobic conditions. Such a system has been established for improvement of bio-P with success at Källby wastewater treatment plant in Lund. The evaluation demonstrated that the process saved significant costs in precipitation chemicals.

# 1 Inledning

I Sverige ställs höga krav vad gäller resthalt av fosfor i renat avloppsvatten och det har medfört att användningen av fällningskemikalier för fosforreduktion är omfattande. Detta ger negativa effekter i form av miljöpåverkan vid tillverkning och transport av dessa kemikalier. Kostnaderna för inköp av kemikalier är också betydande, liksom kostnaderna för behandling av de ökade slammängderna. Den höga halten fällningskemikalier i slammet försvårar också det önskvärda kretsloppet av bland annat näringsämnet fosfor.

För att minska kostnaderna och den negativa miljöpåverkan i samband med användningen av fällningskemikalier har en strävan varit att utveckla system, där erforderlig mängd kemikalier kan minskas eller helt avvaras. Exempel på detta är biologisk fosforreduktion i aktivslamanläggningar och rening av avloppsvatten i dammar eller våtmarker. Kravet på resthalt av fosfor är dock normalt så högt ställt i Sverige att användningen av fällningskemikalier oftast inte helt kan undvikas. En minskning av doseringen av fällningskemikalier är därför i normalfallet målet med de alternativa systemen.

Allt fler kommuner strävar efter att driva sina anläggningar med ”minsta möjliga miljöpåverkan”. En metod för att driva reningsverken på ett sådant sätt är som ovan påpekats att minska användningen av fällningskemikalier och därmed också minska den producerade slammängden.

Hösten 2000 genomförde avdelningen för Vattenförsörjnings- och Avloppsteknik, LTH, med stöd av VA-Forsk ett seminarium om biologisk fosforavskiljning och i samband med det också en inventering av situationen i Sverige. Seminariet visade att intresset för biologisk fosforavskiljning är mycket stort. Efter seminariets genomförande gjorde avdelningen en skiss på ett större projekt om biologisk fosforavskiljning. Genomförandet av ett sådant projekt är troligen en förutsättning för att biologisk fosforavskiljning skulle kunna introduceras framgångsrikt i större skala i Sverige.

Det ursprungliga projektets övergripande mål var att:

- öka kunskaperna om biologisk fosforavskiljning bland driftspersonalen vid landets kommunala avloppsreningsverk;
- skapa ett organ för spridning av information och för erfarenhetsutbyte mellan kommunerna;
- skapa stöd i form av manualer etc. för kommuner, vilket skall underlätta omställningen av driften så att biologisk fosforavskiljning kan uppnås.

Projektet var tänkt att vara uppdelat i fyra faser enligt nedan:

- Fas 0 Problemidentifiering
- Fas 1 Karakterisering, kartläggning och planering
- Fas 2 Uppstart och förutsättningar för drift med bio-P
- Fas 3 Implementering av bio-P i stor skala

Fas 0 har genomförts i samband med det seminarium som arrangerades av avdelningen för VA-teknik, LTH, i samarbete med Öresundsverket, Helsingborgs stad, och som finansierades av VA-Forsk. Slutsatsen från denna fas är att det finns en stor potential för att driva flera anläggningar med biologisk fosforavskiljning. Ett antal projekt har identifierats, vars genomförande är en förutsättning för att biologisk fosforavskiljning skall kunna genomföras framgångsrikt i större skala i Sverige.

Fas 1 har genomförts och är rapporterad i VA-Forsk rapport Nr B 2004-102 *Biologisk fosforavskiljning i Sverige – Karakterisering, kartläggning och planering*. Fas 1 omfattade fyra delprojekt:

- En laborationskurs för personal från avloppsreningsverk har utvecklats och genomförts två gånger. Kurserna varade i vardera tre dagar med en dags teori om bio-P som bakgrund för laboratoriearbetet, en dags laborativt arbete med metoder för utvärdering av avloppsvatten och slam för bio-P och en sista dag för utvärdering och tolkning av resultaten.
- En databas med svenska avloppsreningsverk med bio-P eller med intentionen att introducera processen har etablerats. Den innehåller en lista med ca 25 anläggningar i storleksspannet från 200 till 750 000 PE med uppdaterad information om anläggningarna och deras tekniska möjligheter för drift av bio-P. Databasen innehåller information om storlek och anläggningskonfiguration samt utsläppskrav för anläggningarna. Dessutom är belastning och avloppsvattenkomposition inkluderad, liksom information om kemisk fällning som ett komplement till den biologiska reningen. Slutligen innehåller databasen också information om speciella bio-P-relaterade aktiviteter. För tillfället är databasen tillgänglig för de anläggningar som är med i databasen, men det planeras att göra databasen allmänt tillgänglig.
- Eva Tykesson har doktorerat inom Vattenförsörjnings- och Avloppsteknik vid Lunds Tekniska Högskola med avhandlingen *Enhanced biological phosphorus removal – Processes, competing substances and tools for operation of wastewater treatment plants*. Här ingår studien av molekylärbiologiska metoder för karakterisering av bio-P-bakterier gjord tillsammans med AWMC – Advanced Wastewater Management Centre – vid University of Queensland, Brisbane, Australien. Dessa metoder har visat sig ha god potential för att studera bio-P-organismerna i system med kombinerad biologisk och kemisk fosforavskiljning, vilket är det typiska systemet i Sverige.
- Ett seminarium för uppstart och drift av avloppsreningsverk med biologisk fosforavskiljning har organiserats i samarbete med Käppalaverket. Resultaten från seminariet är presenterade och utvärderade i VA-Forsk-rapport Nr 2004-6 *Kombinerad kemisk och biologisk fosforrening på Käppalaverket, Lidingö – en studie ur ett processtekniskt, mikrobiologiskt och ekonomiskt perspektiv*.

Fas 2 som beskrivs i denna rapport omfattar försök med uppstart och drift av bio-P i fullskala. Omställningen av driften så att biologisk fosforavskiljning kan uppnås beskrivas tillsammans med hur vanliga driftsproblem vid bio-P-drift kan åtgärdas.

## 2 Projektets syfte och genomförande

Trots de uppenbara fördelarna med biologisk fosforavskiljning har introduktionen av tekniken gått långsamt i Sverige. Skälet till att tekniken inte utnyttjas är bl.a. att kunskaperna inte är tillräckliga och att erfarenhetsutbyte och information inte fungerar optimalt. Speciellt finns brist på kunskap om uppstart av anläggningar och hur driftsproblem löses. Projektets syfte är att stärka kunskapen om speciellt dessa delar av problematiken och att sprida kunskap om resultaten.

*Biologisk fosforavskiljning i Sverige – Uppstart och drift* var planerad att bestå av fyra delprojekt.

### **Delprojekt 1: Start av process för biologisk fosforavskiljning efter drift med kemisk fällning**

I detta delprojekt var syftet att bedöma vilka fortsättningar som skall vara på plats innan omställning till biologisk fosforavskiljning kan ske och att ta reda på hur omställning kan ske på verk med kemisk fällning på ett sätt så att omställningen sker snabbt och med så små problem i övergångsfasen som möjligt. Delprojektet genomfördes i samarbete med Lars-Erik Jönsson från Öresundsverket i Helsingborg, som har deltagit i planering och genomförande av projektet.

### **Delprojekt 2: Intern produktion av VFA**

Flyktiga fettsyror (Volatile Fatty acids; VFA) såsom ättiksyra och propionsyra är en grundförutsättning för en lyckad biologisk fosforavskiljning och information om tekniker för intern produktion av VFA skulle insamlas. Hydrolys i försedimenteringsbassängerna så som det sker på Öresundsverket är ett sätt att uppnå extra tillskott. Hydrolys av returslammet så som sker på många ställen i Danmark är ett annat. Försök med hydrolys av returslammet har genomförts vid Källby avloppsreningsverk tillsammans med Lunds kommun. Inverkan av olika driftsförhållanden på produktionen av VFA har studerats, till exempel inverkan av temperaturen och belastningsförhållandena i biosteget.

### **Delprojekt 3: Högt belastade bio-P-anläggningar**

Biologisk fosforavskiljning i en högt belastad aktivslamanläggning utan biologisk kväveavskiljning är en speciell utmaning eftersom anläggningarna drivs vid kort slamålder nära den gräns som finns för processen. Processen var tänkt att studeras vid ett reningsverk i Halmstads kommun, men anläggningen visade sig inte lämpad för ändamålet och det gick inte att genomföra detta delprojekt vid någon annan anläggning.

#### **Delprojekt 4: Kombination av kemisk fällning och biologisk fosforavskiljning för att säkra låga utgående halter**

Reningskravet vad gäller fosfor är ofta så högt ställt att enbart biologisk fosforavskiljning inte är tillräckligt. Störningar kan också förekomma, vilket motiverar användningen av fällningskemikalier. Syftet med detta delprojekt är att utveckla strategier för att använda fällningskemikalier i kombination med bio-P eller vid driftsproblem för att säkerställa låga utgående halter. Delprojekt 4 genomfördes i samarbete med Lars-Erik Jönsson från Öresundsverket i Helsingborg och delvis i samarbete med Anna-Maria Sundin, Käppalaverket, Lidingö, som hade ett VA-Forsk projekt inom området redovisat i rapport Nr 2004-6 *Kombinerad kemisk och biologisk fosforrening på Käppalaverket, Lidingö – en studie ur ett processtekniskt, mikrobiologiskt och ekonomiskt perspektiv*.

Projektets fyra delprojekt har främst genomförts av nuvarande och tidigare medarbetare från Vattenförsörjnings- och Avloppsteknik vid Lunds Tekniska Högskola, (nu Vattenförsörjnings- och Avloppsteknik, Institutionen för Kemiteknik, LTH) Jes la Cour Jansen, Erik Särner, Eva Tykesson och Karin Jönsson. Dessutom har Lars-Erik Jönsson från Öresundsverket deltagit speciellt i delprojekt 1 och 4 och Christer Jonasson och Michael Petersson från Källbyverket i Lund i delprojekt 2.

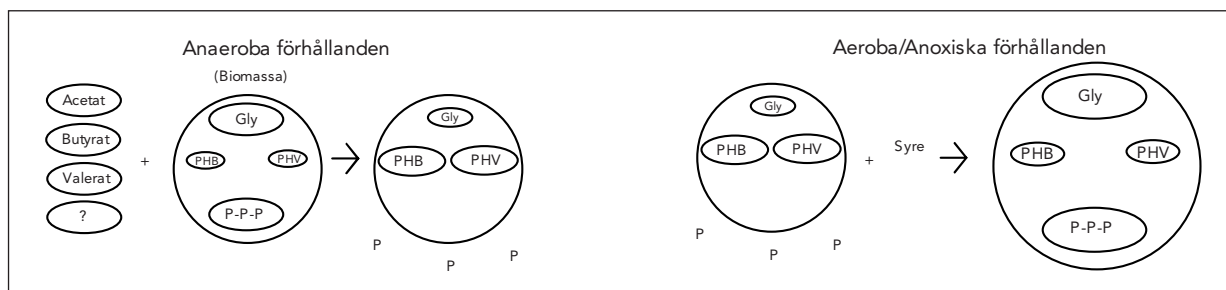
Många andra verk har deltagit i det samlade projektet med kunskap om anläggningar, slam till experiment och diskussioner om bio-P på de träffar som varit under projektets gång. Stort tack till alla som har medverkat i Bio-P-nätverket.

Kunskaperna insamlade under de projekt som genomförts redovisas nedan. Efter en kort genomgång av bio-P-processen i kapitel 3 och av metoder för att karakterisera bio-P-processen i kapitel 4 ges en kort beskrivning av de speciella utmaningar som finns vid kombinerad drift av bio-P processen och kemfällning i kapitel 5. Projektets huvudaktiviteter är uppdelade i 2 kapitel där delprojekt 1 och 4, som båda handlar om kombination av bio-P och kemfällning, beskrivs tillsammans i kapitel 6 och aktiviteterna med intern produktion av VFA i kapitel 7.

### 3 Biologisk fosforavskiljning i kombination med kemisk fällning

Även om de övergripande mekanismerna för biologisk fosforavskiljning är kända behövs det fortfarande mer kunskap om hur processen skall drivas i praktiken. Det är endast ett fåtal reningsverk i världen som har långtidserfarenhet med drift av bio-P anläggningar och kombinationen med mycket låga gränsvärden finns endast i Sverige. Kunskapen om hur processen för biologisk fosforavskiljning fungerar kan översiktligt sammanfattas enligt figur 3-1. Enkla fettsyror såsom ättiksyra, smörsyra etc. (sammanfattat som VFA, Volatile Fatty Acids, flyktiga fettsyror) som föreligger i avloppsvattnet, tas upp av speciella bakterier (bio-P-bakterier) och lagras som polyhydroxyalkanoater (PHB+PHV). Energi för detta ändamål erhåller bakterierna genom att bryta ned upplagrade polyfosfatkedjor, varvid fosfatkoncentrationen ökar i vätskefasen. Troligtvis erhåller bakterierna också energi genom att omvandla upplagrad glykogen till PHB. Under aeroba förhållanden använder bakterierna PHB eller PHV för produktion av biomassa, upptag och lagring av fosfat och eventuellt uppbyggnad och lagring av glykogen. Funktionen är ungefär densamma under anoxiska som under aeroba förhållanden, åtminstone för en del av bio-P-bakterierna.

Om bio-P-processen drivs i kombination med kemisk fällning uppstår en rad konkurrenssituationer. Bio-P-bakterierna använder fosfor i processen, så den kemiska fällningen får inte fälla bort mer fosfor än det som inte används av bio-P-bakterierna. I annat fall uppstår en ny konkurrens, nämligen om VFA. En grupp bakterier (glykogenackumulerande bakterier) kan ta upp VFA utan att använda fosfor. Om denna grupp bakterier gynnas i processen sker därför inget fosforupptag och bio-P-processen fungerar inte. Kombination av biologisk fosforavskiljning och kemisk fällning är därför en balans där man måste låta bio-P-bakterierna ta upp så mycket fosfor som de har behov av för att använda all VFA. Därefter kan man låta den kemiska fällning ta bort resten av den fosfor som behöver avskiljas för att utsläppsvilkåren ska uppfyllas. Denna balans är inte lätt att uppnå på ett reningsverk där mängderna av VFA och fosfor varierar och bakteriernas aktivitet är styrd av pH, temperatur och tillgång på näringsämnen. När de grundläggande mekanismer som beskrivits ovan skall användas för drift av

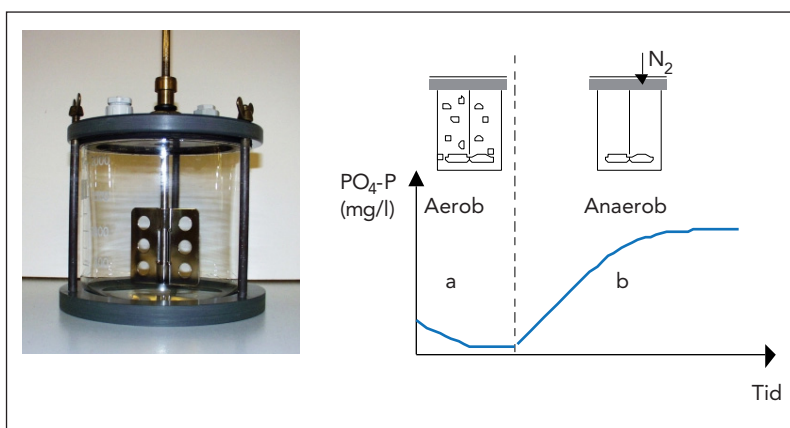


Figur 3-1 Processen för biologisk fosforavskiljning.

reningsverk finns därför många olösta frågor som kräver nya kunskaper och nya metoder som kan tillämpas i praktiken. Speciellt uppstart av processen och övergång till bio-P-drift på en anläggning som har drivits med vanlig kemfällning är en utmaning.

## 4 Mätning av bio-P-aktivitet på anläggningar med kombinerad bio-P och kemisk fällning

Vanligtvis utvärderas bio-P-aktivitet genom att mäta bakteriernas förmåga att släppa eller ta upp fosfor under anaeroba och aeroba förhållanden. Figur 4-1 visar en vanlig utrustning och en skiss av hur fosfor varierar under ett P-släppsexperiment. En detaljerad beskrivning och utvärdering av metoden finns i Tykesson och Jansen (2005).



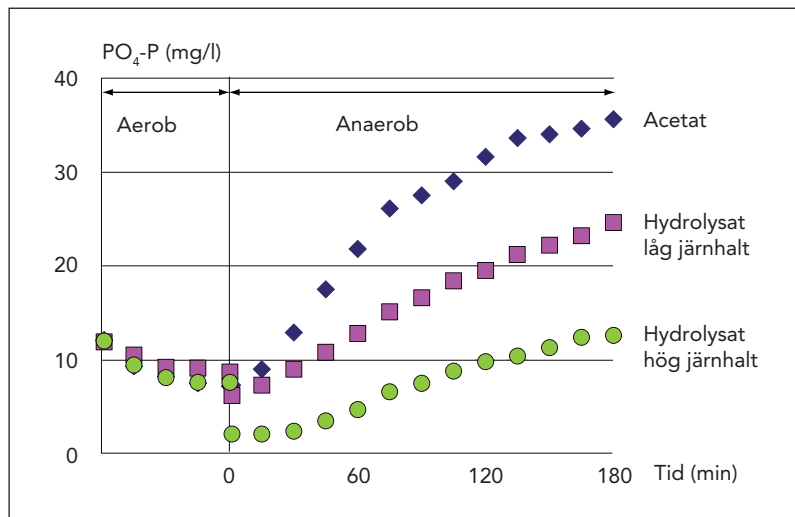
Figur 4-1 Utrustning och skiss av fosforvariation i ett P-släppsexperiment.

Metoden baseras på att mäta P-släppet från aktivt slam med tillsats av acetat eller ättiksyra under anaeroba förhållanden. Innan släppet syresätts slammet för att tillåta upptag av fosfor som är släppt under transport av slammet. Den maximala lutningen av P-släppskurvan är ett mått på halten av bio-P-bakterier. Metoden är rättvisande om bio-P är den enda processen som påverkar fosforhalten under experimentet. På anläggningar med kombinerad process har tillsatsen av kemikalier emellertid också inflytande på frigivningen av fosfor då en del av den släppta fosforn faller ut på ett sådant vis att lutningen på kurvan reduceras och slammet bedöms ha en lägre bio-P-aktivitet än det egentligen har.

Figur 4-2 visar ett exempel med P-släpp från bio-P-slam från Öresundsverket med tillsatt acetat som kolkälla och med hydrolysat från termisk, sur behandling av slam som innehåller ättiksyra och en del järn.

Här syns att hydrolysatet reducerar P-släppet markant; men mindre när en stor del av järnet är borttaget innan experimentet påbörjas.

Även när P-släppet reduceras och tolkas som lägre än det verkliga i närvaro av höga halter järn (eller aluminium) kan ett P-släppsexperiment användas till att bedöma den reella bio-P-aktiviteten. Detta kan ske genom att mäta de joner som släpps av bakterierna tillsammans med fosforn för att bibehålla bakteriernas jonbalans. Vanligtvis antas

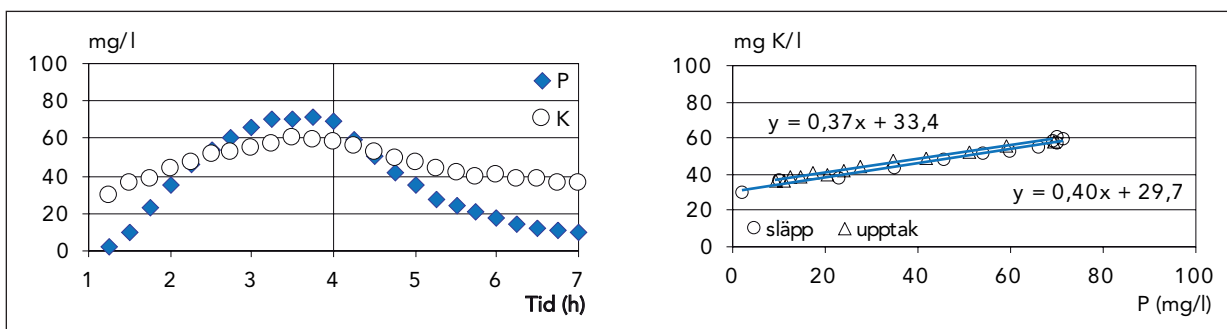


Figur 4-2 P-släpp med acetat och med hydrolysat, med och utan hög järnhalt som kolkälla (från Tykesson, 2002). Kolkällan (acetat eller hydrolysat) är tillsat vid tiden=0.

att en mol negativa fosforjoner motsvarar 1/3 mol positiva kalium och 1/3 mol positiva magnesiumjoner, då magnesium bidrar med 2 positiva laddningar och kalium med 1. Genom att mäta kaliumsläpp eller magnesiumsläpp (eller båda) fås ett indirekt mått på det reella P-släppet opåverkat av eventuella utfällningar av den släppta fosfor. Vanligtvis analyseras kalium som inte faller ut i någon process i vanlig avloppsvattenrening. Magnesium kan eventuellt vid högt pH och höga halter magnesium i vattnet fälla ut magnesium-fosforföreningar under P-släppsexperiment och på så sätt ge samma tolkningsproblem som närvaro av järn.

Figur 4-3 (vänster) visar sambandet mellan P-släpp och kaliumsläpp i ett P-släppsexperiment. Sammanställningen till höger visar att sambandet är linjärt och i stort sett detsamma under släpp och upptag. Lutningen 0,37 och 0,40 mg kalium/mg P ligger ganska nära det teoretiska förväntade molförhållandet på 0,33 mol/mol. En utökad diskussion av kaliums och magnesiums roll i bio-P-processen kan hittas i Tykesson (2005).

Ett annat sätt att mäta bio-P-aktiviteten är att bestämma halten av bio-P bakterier i slammet. FISH, fluorescence in situ hybridisation, är en mikrobiell metod som har blivit vanligt förekommande i



Figur 4-3 Fosfor- och kalium-släpp under ett P-släppsexperiment. (Från Tykesson, 2005).

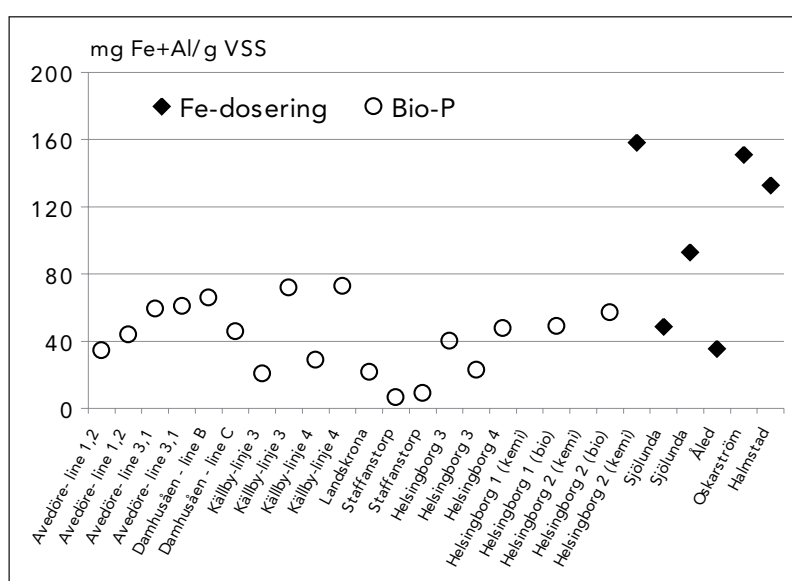
populationsstudier vid avloppsreningsverk. Metoden bygger på identifiering av olika typer av bakterier med hjälp av sekvenser av bakteriernas genetiska material i cellernas ribosomer (16S rRNA). Prober med sekvenser som fångar antingen specifika bakteriearter eller större grupper av bakterier kan väljas. Ett litet aktivslamprov appliceras och prepareras på ett objektglas. Prober tränger in i cellerna och hybridiserar med en komplementär sekvens av nukleotiderna i ribosomernas RNA. Om den komplementära sekvensen inte finns i den aktuella bakterien, tvättas proberna ut ur cellen igen. Proberna är märkta med fluorescence och därför kan cellerna som innehåller den komplementära sekvensen och därmed de bundna proberna visualiseras med speciella mikroskop (antingen epifluorescence microscope eller confocal laser scanning microscope (CLSM)). Metoden är djupare beskriven i Amann et al. (1995). Mer detaljer poängteras i Bond et al. (1999) och Saunders et al. (2003) där FISH appliceras på bio-P-slam.

## 5 Kemisk fällning och bio-P

### 5.1 Varför kombinera bio-P och kemisk fällning?

Det främsta skälet till att kombinera biologisk fosforavskiljning med kemisk fällning är de stränga svenska krav som ställs på reningskvalitet. De internationellt sett stränga fosforkraven på 0,3–0,5 mg/l ställer höga krav på optimering av processen och på processtabilitet. Detta i kombination med att kraven ofta formuleras som månads- eller kvartalsmedelvärden, ställer till ytterligare problem för biologiska processer där processtörningar inte återhämtas lika snabbt som vid kemisk fällning. Det största problemet på många anläggningar är perioder av brist på VFA till exempel i anknäytning till sommarsemester, då bidrag från industrier kan falla bort, eller i perioder med mycket nederbörd, då VFA-halterna vanligtvis reduceras och då hydrolys i försedimenteringsbassänger fungerar sämre.

Omfattningen av den kombinerade processen har kartlagts inom projektet genom mätning av P-släpp på en lång rad anläggningar för att dokumentera omfattningen av bio-P-aktivitet i kombination med mätningar av järn- och aluminiumhalter i slammet för att bedöma användningen av fällningsmedel. Figur 5-1 visar resultatet från 20 svenska och danska anläggningar/anläggningslinjer. Uppdelningen i anläggningar med bio-P eller med enbart kemisk fällning är baserad på mätning av P-släpp och på information om anläggningarnas driftsätt. Figuren visar att ganska få anläggningar har låg metallhalt i slammet och att bio-P-anläggningarna oftast har lägre metallanvändning än anläggningar med enbart kemisk fällning; men fortfarande i många fall med en relativt hög metallhalt i slammet.



Figur 5-1 Järnhalten i slam från anläggningar med bio-P jämfört med slam från anläggningar med enbart kemfällning.

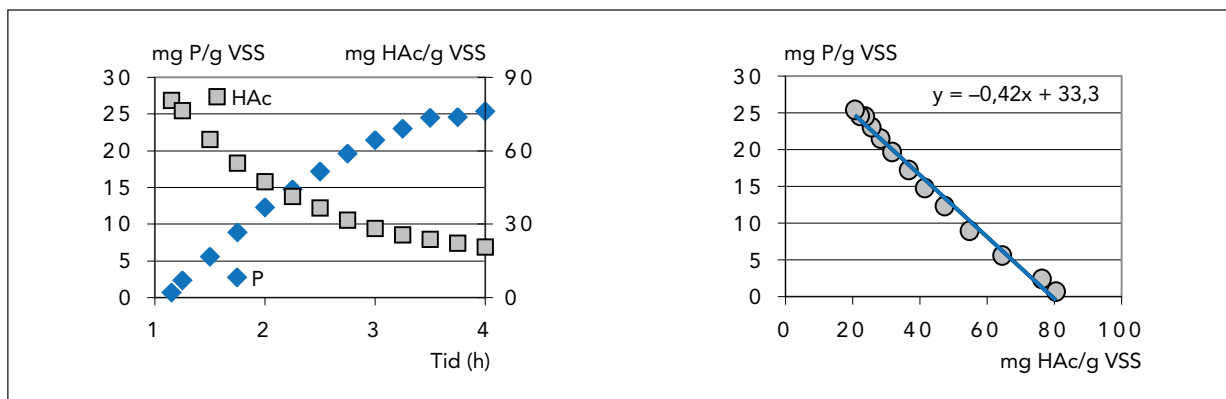
## 5.2 Konkurrens om fosfor i reningsverket

Som en del av Eva Tykessons doktorsarbete finansierade VA-teknik en särskild studie av konkurrensförhållanden mellan bio-P-bakterier (PAO) och glykogenackumulerande bakterier (GAO), som tar upp VFA men inte använder P-släpp och -upptag i sin metabolism, i ett system där biologisk fosforavskiljning och kemfällning kombineras. Under en forskningsvistelse i Brisbane, Australien tillämpades vanliga VA-tekniska metoder i kombination med FISH i syfte att dokumentera hur populationerna av bakterier påverkades av kemfällning. Syftet var även att ta fram enklare metoder än FISH för att mäta aktiviteten av GAO. Den samlade beskrivningen av experimenten finns i Tykesson (2005). Tanken bakom experimenten var att förhållandet mellan populationerna av PAO/GAO kan mätas med kvoten mellan upptag av VFA och P i ett fosforsläppsexperiment. Då GAO tar upp VFA under anaeroba förhållanden, men utan att släppa P, fås ett lägre förhållande mellan P-släpp/VFA-upptag i experimentet om GAO finns i slammet. Ett lågt förhållande P/VFA kan därför användas för att bedöma mängden GAO. Det krävs bara att VFA analyseras parallellt med fosfor i testet. Figur 5-2 visar resultatet av sådana mätningar.

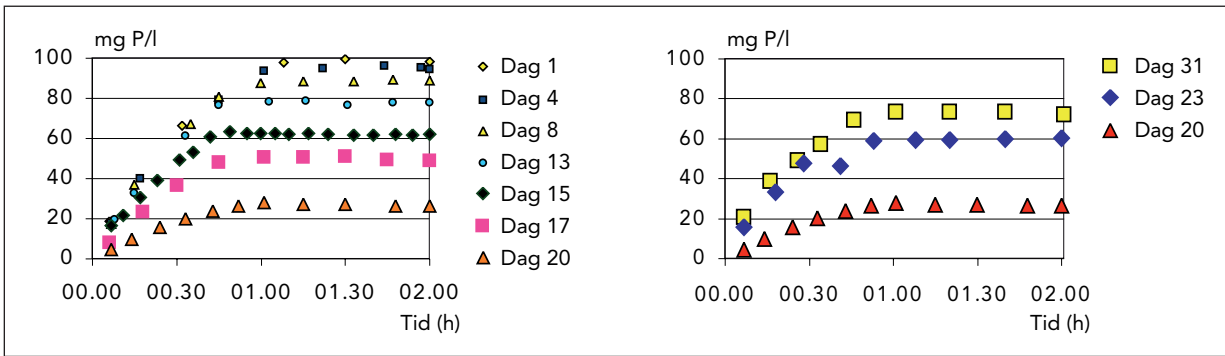
I litteraturen finns teoretiska modeller för kvoten och Barnard och Scruggs (2003) anger kvoten till 0,5 mg P/mg HAc för en etablerad, välfungerande bio-P-process. Om kvoten är väsentligt lägre kan det antas att VFA tas upp av GAOs. Värdet i figur 5-2 på 0,42 visar att PAO dominerar; men att där finns en viss andel GAO.

I ett försök drevs en bio-P-laboratorieanläggning med bra bio-P-funktion i 3 faser. I fas 1 doserades en låg men stigande dos järnklorid. I fas 2 blev dosen höjd stegvis till den maximala nivån och i fas 3 togs doseringen av järnklorid bort. Under hela förloppet gjordes P-släpps-experiment med mätning av P-släpp och VFA-upptag och populationerna av GAO och PAO blev kartlagda med FISH med jämna mellanrum. Figur 5-3 visar till vänster P-släpp i fas 1 och 2 med stigande järndos och till höger fas 3 där järndoseringen togs bort.

Figuren visar att P-släppet sjunker efterhand som dosen höjs och åter ökar efter en tid när järnet tas bort. P-släppet är reducerat till ca 25 % i den sista delen av fas 2.



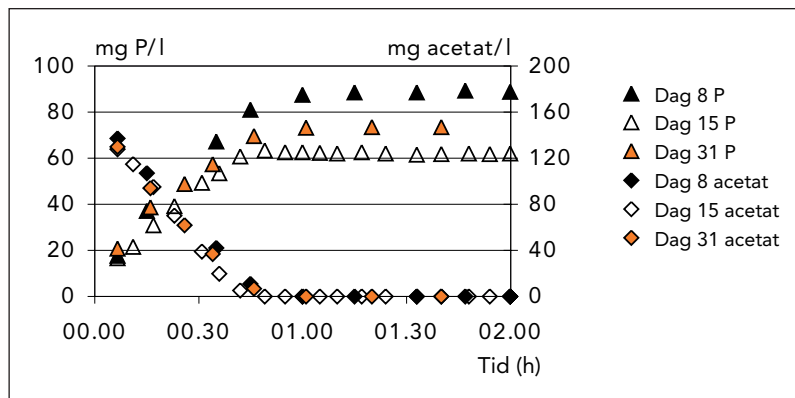
Figur 5-2 P-släpp och VFA (här acetat, HAc)-upptag under ett släppförsök (vänster) och linjär regression av sambandet mellan P-släpp och VFA-upptag. Figuren visar att kvoten P/VFA är 0,42.



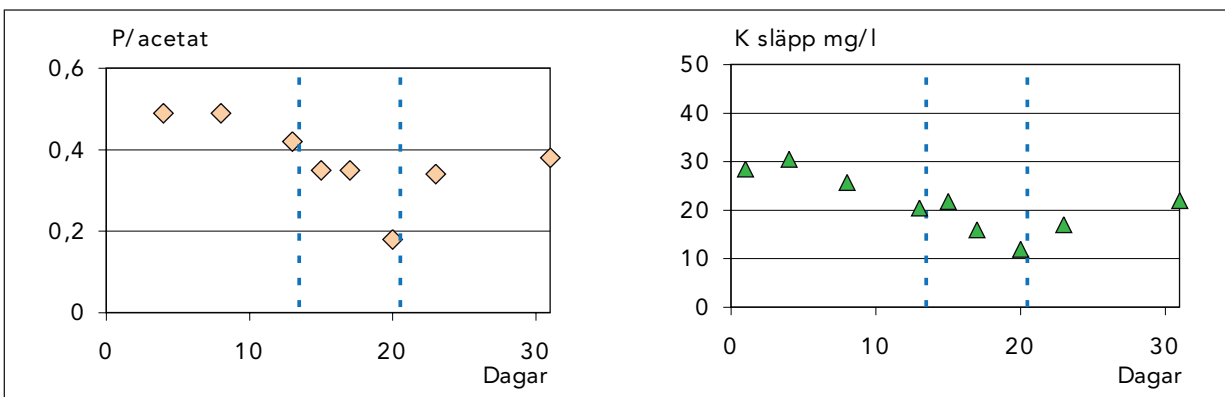
Figur 5-3 P-släppsexperiment med kombination av bio-P och kemfällning. P-släpp med ökande järndos till vänster och efter stopp av dosering till höger. Kaliumsläppet blev mätt parallellt med P-släppet.

Figur 5-4 visar ett experiment från varje fas med P-släpp och VFA-upptag. Figuren visar att all VFA tas upp oberoende av P-släppet och i figur 5-5 visas kvoten P/VFA genom de 3 faserna tillsammans med kaliumsläppet.

Figur 5-5 visar att kvoten P/VFA är ca 0,5 i början av experimentet men sjunker kraftigt under fas 1 och 2. Den lägre kvoten är inte ett resultat av samma P-släpp; men reducerad P-halt i vattnet som följd av utfällning av P som ett resultat av järndoseringen då kalium-släppet reduceras i samma mönster som fosfor. Andra bakterier än PAO tar därför upp VFA utan att släppa P. FISH-kvantifiering visade att halten



Figur 5-4 P-släppsexperiment från varje fas med P-släpp och VFA-upptag.



Figur 5-5 Kvot P/VFA genom experimentets 3 faser (vänster) och kalium-släpp (höger).

av de kända PAO-bakterierna sjönk från 52 % vid start till 35 % vid slutet av fas 2.

Experimenten visar att kemfällning har en potential att gynna GAO. Om fällningen tar bort fosfor så att PAO inte kan ta upp all VFA kommer troligen GAO-bakterier att göra detta. Risken är då att GAO helt tar över VFA-upptaget så att fosforavskiljningen inte längre fungerar.

### **5.3 Hur kan man kombinera bio-P och kemisk fällning?**

Erfarenheterna från experimenten bör tas med i planeringen av hur man kombinerar biologisk fosforavskiljning och kemisk fällning. Det viktigaste är att den biologiska fosforavskiljningen utnyttjar inkommande VFA på bästa möjliga sätt så att konkurrensen om VFA mellan PAO och GAO inte förändras till fördel för GAO och på så vis att behovet av kemikalier är så lågt som möjligt. I praktiken betyder det att intermittent dosering är bäst om villkoren för biologisk fosforavskiljning generellt är bra; men kortare perioder med VFA-brist förekommer. Om kontinuerlig dosering är nödvändig kommer biologisk fosforavskiljning att vara svår att kombinera med förfällning. Simultanfällning går att kombinera, bäst om kemikaliedoseringen sker mellan den aktiva slamtanken och sedimentationstanken på ett sådant sätt att den biologiska processen fungerar med minsta möjliga påverkan från kemikalierna. Kombinationen går självklart lättast om processerna skiljs helt så att kemikalierna används i en efterfällningsanläggning eller som stöddosering i ett filter. I kapitel 6 beskrivs två experiment med uppstart av bio-P på anläggningar med simultanfällning och en rad experiment med tillsats av kemikalier för att lösa driftsproblem av kort varaktighet på ett bio-P-verk.

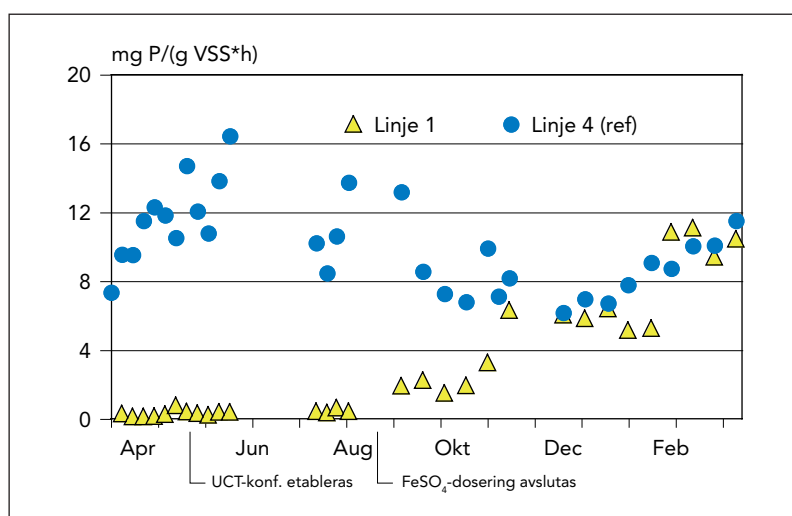
## 6 Uppstart och drift av anläggningar med kombinerad bio-P och kemfällning

### 6.1 Uppstart av anläggningar med bio-P

Laboratorieexperiment med kombination av kemfällning och biologisk fosforavskiljning har genomförts för att etablera strategin för avveckling av kemikaliedoseringen (omedelbar, långsam eller i takt med etableringen av bio-P-processen). I arbetet har specifik karakterisering av bio-P-bakterierna (PAO) genom användning av FISH-teknik utnyttjats till att kvantifiera variationerna av PAO.

Tillsammans med Öresundsverket har starten av en process för biologisk fosforavskiljning efter drift med kemisk fällning studerats i fullskala. Strategin vid försöken var att genomföra en långsam avveckling av fällningskemikalierna i en linje på Öresundsverket. Avsikten var att få kunskaper om processförloppet så att anvisningar för en sådan start kan formuleras. Bedömningens utgångspunkt är att det finns tillräckligt med VFA för tillväxten av bio-P-bakterierna. Dessa skall naturligtvis finnas i anläggningen. Släppförsök har använts för att karakterisera övergången från kemisk till biologisk avskiljning av fosfor. Förekomsten av bio-P-bakterierna, samt bakterier som konkurrerar med bio-P-bakterierna om tillgänglig VFA, följs härigenom.

Introduktion av bio-P kommer i de flesta fall att ske i en befintlig anläggning som drivs med simultanfällning. Uppstart är gjort i en del fall på Öresundsverket i Helsingborg i samband med anläggningens många experiment med biologisk fosforavskiljning. Anläggningen drivs med parallella linjer och i flera fall har ett skifte skett från simultanfällning till bio-P. Ett exempel på en sådan uppstart visas i figur 6-1. Uppstarten har skett vid omställning av simultanfällningslinjen till



Figur 6-1 Maximal P-släppshastighet i en bio-P linje (4) och i en linje som skiftar från simultanfällning till bio-P linje (1).

bio-P-konfiguration med en anaerob förtank och start av primärslamhydrolys vid borttagning av kemfällningen. Uppstarten följdes med P-släppsexperiment som beskrivits i kapitel 4.

Av figur 6-1 framgår att det maximala P-släppet varierar något och att omställningen till bio-P-konfiguration på anläggningen inte leder till synbart P-släpp. Efter stopp av järndoseringen stiger P-släppet långsamt de närmaste månaderna; men först några månader efter stopp av doseringen och mer än ett halvår efter omställning till bio-P-drift är P-släppet på samma nivå som för den linje som har drivits med bio-P under lång tid. Anläggningens slamålder är lång och det är naturligt att släppet stiger långsamt i perioden då mycket järn finns kvar i anläggningens slam; men PAO är inte speciellt långsamtväxande så det är förvånande att uppstarten tar så lång tid. Järnet har säkerligen under de första månaderna inte tillåtit PAO att få tillgång till fosfor för tillväxt.

I ljuset av de experiment som redovisats ovan genomfördes i samband med Käppalaverkets VA-Forskprojekt 2004-6 *Kombinerad kemisk och biologisk fosforrening på Käppalaverket, Lidingö – en studie ur ett processtekniskt, mikrobiologiskt och ekonomiskt perspektiv* (Borglund, 2004) experiment med uppstart av bio-P – i fullskala utifrån en hypotes om att tillväxten av GAO blev gynnad om anläggningen introducerade en anaerob zon för bio-P innan fällningskemikalierna togs bort eller blev reducerade. Tanken var att om VFA är tillgängligt under anaeroba förhållanden; men inte P p.g.a. kemikalierna kunde detta resultera i tillväxt av GAO som i sin tur kan försvåra tillväxten av PAO när kemikaliedoseringen reduceras.

Den anaeroba zonen blev introducerad och först efter 1 månad stoppades kemfällningen. Som förväntat hade bio-P-processen problem med att komma i gång och det lyckades inte att få etablerat en stabil process för biologisk fosforavskiljning. P-släppsexperiment visade en låg kvot P-släpp/VFA-upptag på 0,1, vilket är mycket lägre än det som kan förväntas en stabil bio-P-process och är en bra indikation på att en stor del av VFA tags upp av GAO. Försök med att göra FISH-studier på slammet var inte så lyckat eftersom både PAO och GAO fanns i låga halter. Problemet kan förklaras med att det finns flera typer GAO som inte täcks in av de analyser som gjorts. Den misslyckade uppstarten kan även förklaras av att VFA-halten generellt var lägre än den optimala i avloppsvattnet och flera långhelger under våren uppvisade sämre tillgång på VFA. Också tidvis nitratåterföring till anaerobzonen kan ha ställt till problem. Även om experimentet inte var helt lyckat är det sannolikt att en uppstart av bio-P inte skall börja med en omställning till bio-P-drift förrän kemfällningen tagits bort. Senare startades bio-P-processen upp på Käppalaverket; men med andra strategier för uppstarten. Resultaten redovisades detaljerat i Borglund (2004).

## 6.2 Stöddosering

Många svenska anläggningar som drivs med bio-P kommer konstant eller tidvis att vara i behov av stöddosering med fällningskemikalier för att säkerställa att utsläppsvillkoren uppfylls. Om VFA-halten

generellt är låg kan det finnas behov av kontinuerlig stöddosering; men ofta kommer behovet att vara knutet till speciella, korta perioder med reducerad tillgång på VFA och då finns behov av att dosera järn under en period. Ganska många experiment har gjorts för att utvärdera hur doseringen skall göras och hur problem med bio-P-processen kan undvikas i samband med kortvariga perioder med stöddosering. Nedan redovisas resultat från en rad centrala experiment i fullskala utförda vid Öresundsverket. Experiment med kontinuerlig dosering och experiment med dosering under kortare perioder i samband med sommarsemester och perioder med mycket nederbörd redovisas.

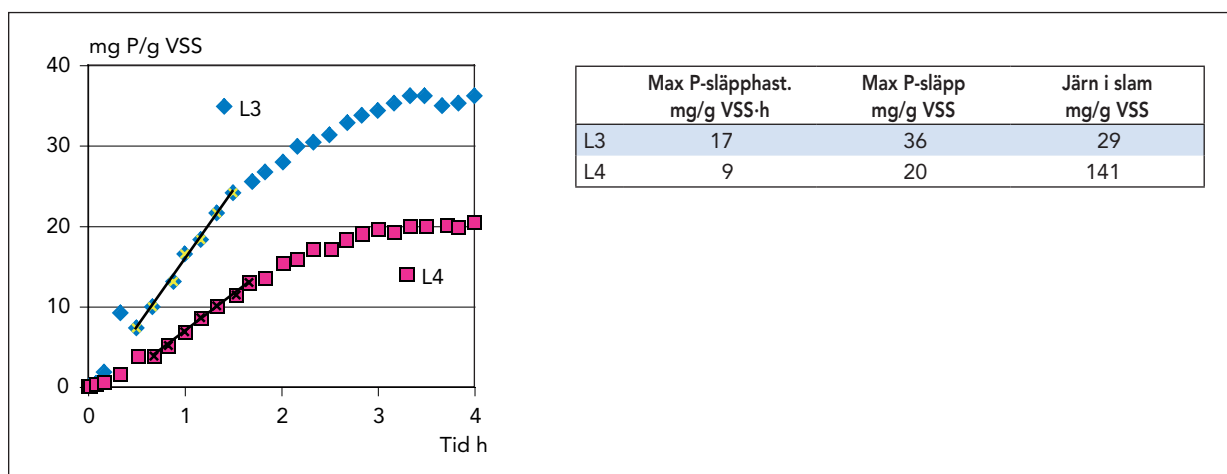
### 6.3 Kontinuerlig dosering

Bio-P-processen kan drivas med kontinuerlig dosering av järn i en simultanfällningsprocess utan stora problem om järndosen inte är för hög. Doseringen kan vara nödvändig för att säkerställa låga utgående halter av fosfor. Utöver kostnaderna för kemikalier och extra slambehandling reduceras slammets kapacitet för biologisk fosforavskiljning. Figur 6-2 visar P-släppsförsök på Öresundsverket med slam från 2 linjer, en med enbart bio-P och en med kontinuerlig dosering av lite järn.

Det framgår att den maximala P-släppshastigheten och det maximala P-släppet reduceras när järn doseras. Anläggningens potential att hantera variationer i inkommande P reduceras därmed.

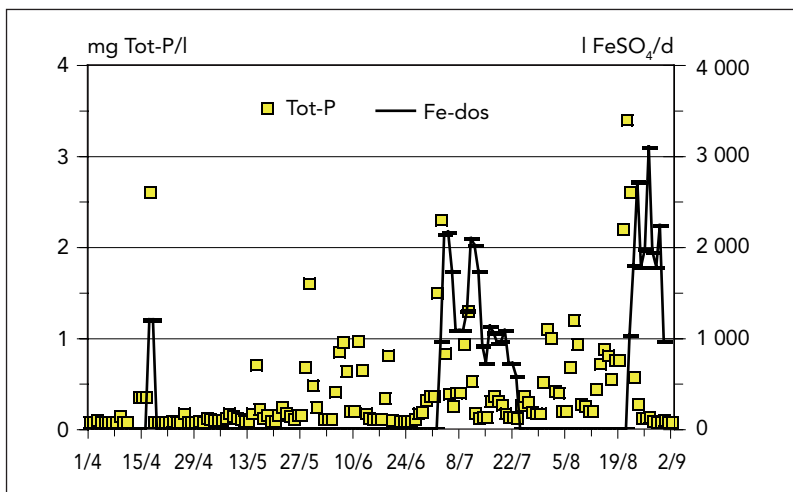
### 6.4 Dosering under semesterperioder

Sommersemesterperioden har under många år gett problem med bio-P-processen på Öresundsverket. Problemet förklaras med att industrier som bidrar med organiskt material och speciellt VFA stängs ner under en period. Resultatet är att utgående fosforhalter från de linjer av anläggningen som drivs med bio-P stiger och simultanfällning med



Figur 6-2 P-släpp uppmätt för slam från parallella linjer på Öresundsverket i Helsingborg. En linje utan järndosering och en med en låg dos.

stöddosering av kemikalier får användas. Under några somrar har en strategi med dosering efter behov blivit testad. Med ledning av dagliga mätningar av fosforhalten i utgående vatten från bio-P-linjerna har järnsulfat doserats efter behov. Figur 6-3 visar utgående fosfor och den järnsulfatdos som har använts i detta enkla doseringsfall.



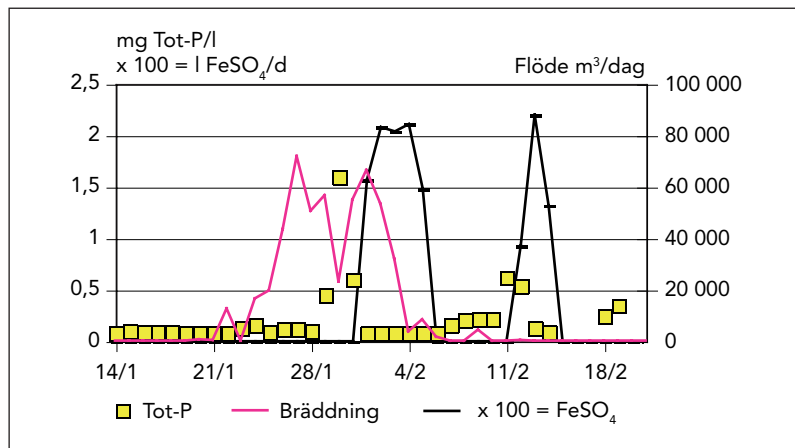
Figur 6-3 Stöddosering av järnsulfat på Öresundsverket under en sommarperiod baserad på dosering efter behov enligt dagliga fosformätningar i utgående vatten.

Det framgår att man kunde uppnå ett rimligt lågt medelutsläpp av fosfor från bio-P-linjen med en moderat järndos. Det framgår också att bio-P-processen själv även efter längre perioder med dosering kan upprätthålla en bra avloppskvalitet.

## 6.5 Dosering vid höga flöden

Perioder med höga flöden p.g.a. längre regnperioder kan på många verk försämra VFA-tillgången till reningsverk. Speciellt på anläggningar med hydrolys i försedimenteringarna, som på Öresundsverket, ställer dessa perioder till problem. I figur 6-4 visas den strategi som är utvecklad för stöddosering i dessa fall. I figuren är bräddningen från anläggningens utjämningsmagasin använt som mått på perioder med högt flöde; men strategin har på samma sätt som under sommarsemesterperioden varit att dosera baserat på behovet som i sin tur framgår av fosformätningar på utloppet från bio-P-linjen.

Det framgår att när högt flöde uppkommer stiger fosforhalten i utloppet. Stöddosering av järnsulfat säkerställer snabbt låga utloppsvärden. Bio-P återhämtar sig snabbt när kemfällningen stoppas. Ytterligare detaljer om optimering av bio-P på Öresundsverket kan hittas i Tykesson (2005).



Figur 6-4 Exempel på stöddosering under en kort regnig period på Öresundsverket där kemfällning med järnsulfat använts för att säkerställa låga fosforhalter under perioder då VFA-försörjningen är för låg för att uppnå tillräcklig biologisk fosforavskiljning. Bräddningen från anläggningens utjämningsmagasin används som mått på perioder med högt flöde.

## 7 Hydrolysis av retursslam – försök vid Källby avloppsreningsverk

### 7.1 Intern produktion av VFA

Vid biologisk rening omvandlas komplexa organiska föreningar till mer lättnedbrytbara föreningar. Denna så kallade hydrolysisprocess sker i den biologiska processens alla delar under anaeroba, anoxa och aeroba förhållanden. Komplexa organiska föreningar omvandlas till enkla lösliga ämnen (hydrolysis), vilka i sin tur överförs till flyktiga fettsyror mm (syrabildning). De bildade lättnedbrytbara organiska föreningarna används i de olika zonerna för biologisk fosforavskiljning, denitrifikation och för aerob nedbrytning. Hydrolysisen är normalt den begränsande processen, vilket innebär att om avloppsvattnets innehåll av lättnedbrytbara föreningar är lågt blir produktionen av flyktiga fettsyror låg. Möjligheter finns då att utnyttja det primärslam och/eller överskottsslam som bildas vid reningsverket för att producera lättnedbrytbara organiska föreningar och flyktiga fettsyror.

TVå typer av slam finns tillgängliga för intern produktion av lättnedbrytbara organiska ämnen: primärslam och biologiskt överskottsslam. Ett primärslam innehåller en större andel organiska ämnen, vilka kan omvandlas till lättnedbrytbara ämnen. Slammet kan behandlas i en volym vid sidan om vattenströmmen eller i en tank i vattenströmmen. Ett exempel på det senare är den hydrolysis av primärslam som sker i försedimenteringen vid Öresundsverket i Helsingborg (Christensson et al., 1998). Ett bioslam innehåller en lägre andel organiska ämnen som kan omvandlas till lättnedbrytbara ämnen än ett primärslam. Totala tillgången på bioslam som cirkulerar i anläggningen är emellertid stor. Totalt kan därför en lika stor eller större mängd lättnedbrytbara organiska ämnen produceras genom hydrolysis av bioslam. Också hydrolysisen av bioslam kan ske vid sidan av eller i den normala slam- eller vattenströmmen. Om hydrolysisen sker vid sidan av den normala vattenströmmen är processen mindre känslig för höga flöden (Henze et al., 1997). Enklart är att produktionen sker i den normala slamströmmen genom att retursslammet passerar en anaerob tank innan det leds vidare till biobassängen och blandas med vattenströmmen. Om så sker skulle till och med den anaeroba volymen i huvudströmmen kunna undvaras (Petersen, 2002).

Inom ramarna för detta projekt har fullskaleexperiment genomförts med sidostromshydrolysis vid Källbyverket i Lund. Resultaten från dessa experiment har tidigare efter avtal med Svenskt Vatten Utveckling publicerats i en artikel i Tidskriften Vatten (Särner et al., 2004) Resultaten nedan är en återgivning av de resultat som publicerats i tidskriften.

## 7.2 Källby avloppsreningsverk – försöksanläggning Källbyverket

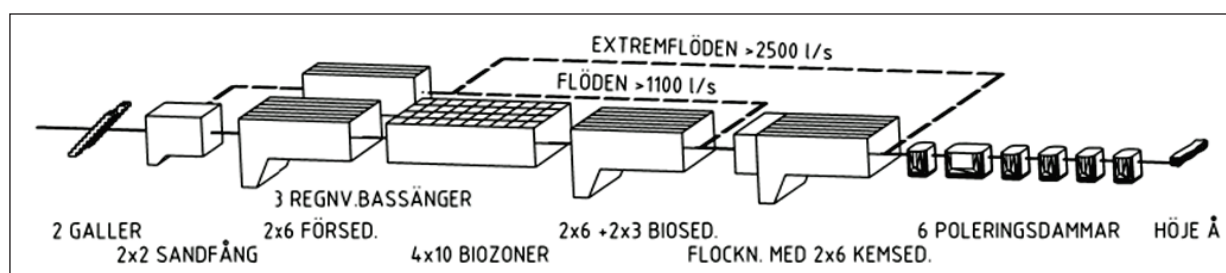
Källbyverket i Lund har under åren genomgått flera om- och tillbyggnader. En av de mest omfattande färdigställdes 1997. Verkets biologiska bäddar byggdes då om till aktivslam och kompletterades med ytterligare biovolym för att klara ställda kvävekrav. Dimensionerande data och aktuell belastning framgår av tabell 7-1. Efter om- och tillbyggnaden 1997 erhöll verket en utformning enligt figur 7-1. Data för reningsverket är sammanställda i tabell 7-2. Anläggningsdelarna är uppdelade i 2 linjer för mekanisk behandling, 4 linjer för biologisk behandling, 2 linjer för kemisk behandling och 1 linje för efterbehandling i poleringsdammarna. Den biologiska kvävereduktionen sker genom fördenitrifikation.

Tabell 7-1 Dimensionerande och aktuell belastning på Källby avloppsreningsverk, Lund.

	Dim. belastning	Aktuell belastning
Personer, pe	90 000	78 300
Organiskt material, kg BOD/d	4 900	4 900
Fosfor, kg P/d	280	190
Kväve, kg N/d	1 550	1 120
Torrväderstillrinning, m <sup>3</sup> /d		25 000 – 45 000

Tabell 7-2 Anläggningsdata för Källby avloppsreningsverk, Lund.

Anläggningsdel	Antal	Volym, m <sup>3</sup>	Yta, m <sup>2</sup>
<b>Mekanisk rening</b>			
Galler	2		
Sandfång	4	310	
Regnvädersbassänger	2	1 860	990
Försedimentering	12	3 720	1 920
<b>Biologisk rening</b>			
Biovolym	4	20 800	
Mellansedimentering	18	9 040	3 420
<b>Kemisk rening</b>			
Flockning	8	1 040	
Slutsedimentering	12	4 320	2 160
<b>”Polering”</b>			
Biodammar	6	122 500	



Figur 7-1 Schematisk skiss över uppbyggnaden av Källby avloppsreningsverk.

Verkets biosteg utformades också med möjlighet till biologisk fosforreduktion. Vid ett sådant driftsätt tillförs avloppsvatten från försedimenteringen den första omrörda zonen i varje linje, medan returslam och recirkulerat nitrat leds förbi denna zon. Slamhalten i zonen hålls uppe genom återpumpning av slam från zon 3 alternativt 5, beroende på hur många luftade zoner som är i drift. (Se figur 7-2, där dock den ombyggda försökslinjen visas.) Detta driftsätt pågick endast en kort tid efter ombyggnaden 1997 beroende på att inget anaerobt tillstånd erhöles och därmed inget fosforsläpp. Mängden lätt nedbrytbart organiskt material i inkommande avloppsvatten var alltför lågt för att resthalterna av syre och nitrat skulle förbrukas. Den kemiska behandlingen sker med järnklorid som fällningsmedel. Kemslammet återförs till inkommande avloppsvatten efter fingallren. Även uttaget biologiskt överskottslam återpumpas till samma plats. Det till slambehandlingen uttagna slammet från försedimenteringsbassängerna är således ett blandslam bestående av primär-, överskott- och kemsлам. I slambehandlingen förtjockas det uttagna blandslammet i mekanisk förtjockare, rötas och avvattnas mekaniskt med centrifuger. Rejekten från den mekaniska förtjockningen och centrifugeringen leds till vattenbehandlingen efter fingallren.

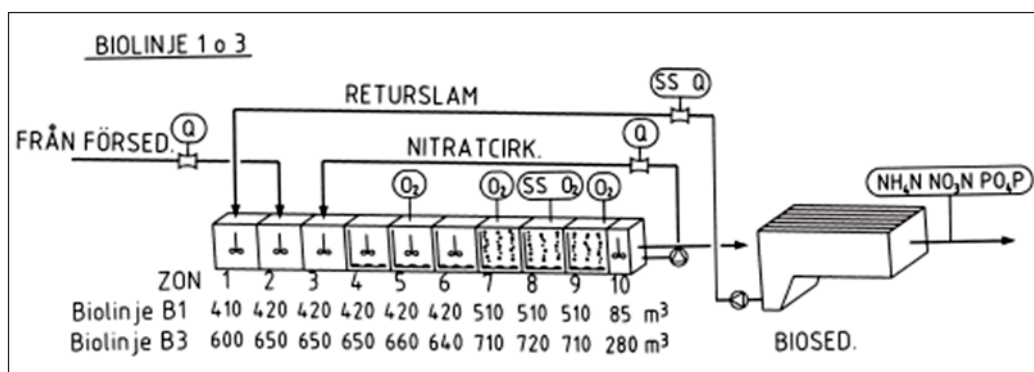
### 7.3 Övervakning/instrumentering

I biolinjerna mäts avloppsvattenflöde, nitratslamflöde och returslamflöde samt luftmängd till luftade zoner. Den suspenderade substansen mäts kontinuerligt på två platser i varje biolinje: returslam och aktivt slam i zon 8 (figur 7-2).

Från utgående avloppsvatten i respektive biosedimentering uttas vatten automatiskt en gång i timmen för analys av halterna ammoniumkväve, nitratkväve och fosfatfosfor.

### 7.4 Försöksanläggning i full skala

Den biologiska behandlingen vid Källbyverket sker i fyra biolinjer. Två av linjerna är till aktivslamanläggning ombyggda biobäddar med



Figur 7-2 Försökslinjernas utformning efter ombyggnad för slamhydrolys.

tillhörande sedimenteringsbassänger och två linjer finns i den 1997 tillbyggda anläggningsdelen. Till de ombyggda linjerna pumpas ca 40 % avloppsvatten från försedimenteringen och till de två tillbyggda linjerna leds ca 60 % av vattnet med självfall. Zonindelningen i samtliga linjer är utformade på samma sätt. Linjerna består av tre zoner som är enbart omrörda, tre zoner som är omrörda alternativt luftade, tre zoner enbart luftade samt slutligen en omrörd mindre deoxidationszon. Detta framgår av figur 7-2. I maj 2003 byggdes biolinje 1 om så att hydrolys av returslam kunde ske i biolinjens första zon. Biolinje 1 är en av de två ombyggda linjerna. Returslammet från biosedimenteringen kunde redan tidigare tillföras zon 1, medan ledningarna för inkommande avloppsvatten från försedimenteringen och nitratrecirkulationen från zon 10 fick ändras så att de kunde ansluta till zon 2 respektive zon 3 (se figur 7-2). Efter ett antal provtagningsomgångar i biolinje 1 beslutades att motsvarande ombyggnad skulle utföras i biolinje 3, vilken är en av de två nybyggda linjerna. Det finns således två ombyggda linjer; biolinjerna 1 och 3, vilka har var sin kontrollinje med det gamla utförandet; biolinjerna 2 respektive 4.

## 7.5 Resultat

Resultaten från dygnsprovtagningar redovisas i tabell 7-3. Mängden rejektvatten från blandslamförtjockare, mekanisk förtjockare och centrifug var under perioden ca 690 m<sup>3</sup>/d. Rejektvattnet återleds till inkommande vatten. Inblandningen av rejektvatten i huvudströmmen sker emellertid på ett sådant sätt att linjerna 1 och 2 (de ombyggda linjerna) får huvuddelen av rejektet. Detta framgår av halterna kväve, fosfor och COD i det försedimenterade vattnet. (Se tabell 7-3).

Inkommande flöde var ca 13 000 m<sup>3</sup>/d till biolinjerna 1 och 2 och ca 17 000 m<sup>3</sup>/d till biolinjerna 3 och 4. Slamrecirkulationsflödet var ca 70 % och nitratrecirkulationsflödet drygt 200 % av inkommande flöde. Slamhalterna var ca 3 600 mg/l i biolinjerna 1 och 2 och 2 100 mg/l respektive 2 900 mg/l i biolinjerna 3 respektive 4. Knappt 75 % av slammets halt suspenderad substans var organiskt. Förutom ovanstående mättes också halterna COD i filtrerade prov i zonerna 1 och 2. Dessa var endast obetydligt högre än motsvarande värde efter biosedimenteringen, vilket visar att den lättnedbrytbara delen av COD snabbt använts av organismerna.

Belastningen på bioprocessen var låg, speciellt på linjerna 3 och 4. Slambelastningen var ca 0,1 kg COD/(kg TSS·d). Med en låg belastning uppstår troligen anaeroba förhållanden i anox-zonerna beroende på att nitraten tidvis ”tar slut”. Detta kan vara förklaringen till de goda fosforavskiljningar som tidigare uppmätts i biosteget.

Bioprocessen har också visats påverkas av kraftigt regn, där ledningssystemet spolats rent från avlagrat, delvis hydrolyserat slam. Effekten av ett sådant regn har ofta varat i flera veckor med förhöjd fosforavskiljning i bioprocessen som resultat. Regnet/det höga flödet som sådant förväntas inte vara positivt, men att det i ledningarna sedimenterade slammet hamnade i verket var det. Några undersökningar om vad som

händer har inte gjorts. Processen i linjerna 1 och 2 har en annan geometrisk utformning än i de nybyggda linjerna 3 och 4, även om de i princip är utformade på samma sätt. De är dessutom enligt ovan olika belastade beroende på belastningen av rejektivatten. En direkt jämförelse är därför svår att göra. Biolinjerna 1 och 2 är identiskt utformade med undantag för de ändringar i flödesriktningar som gjorts i linje 1 för att erhålla hydrolys av returslammet. Följande kan noteras vid en jämförelse av resultaten från dessa två linjer:

- Ett tydligt fosforsläpp kan ses i zon 1 i försökslinjen (linje 1). Endast returslam tillförs zonen, vilket innebär att organiska ämnen för VFA-produktion endast tas från det recirkulerade slammet. Eftersom bildat VFA snabbt tas upp av bio-P- bakterierna vid fosforsläppet uppmättes mycket låga halter VFA i zonen.
- I zon 2 i försökslinjen, till vilken det försedimenterade avloppsvattnet förs, sker ett ytterligare fosforsläpp. Ökningen av halten fosfatfosfor är liten, men eftersom en kraftig utspädning med försedimenterat vatten skett visar analyserna att fosforsläppet är betydande också i denna zon.
- Också i kontrollinjen (linje 2) sker ett visst fosforsläpp i zonerna 1 och 2. I denna linje leds det försedimenterade avloppsvattnet in i zon 1 tillsammans med recirkulerat slam och nitratrikt vatten. Fosforsläppet är dock väsentligt mycket lägre än i försökslinjen.
- Halten  $\text{PO}_4\text{-P}$  och halten totalfosfor i ofiltrerade prov (Pof) efter biosedimenteringen är lägre i försökslinjen än i kontrollinjen, vilket visar att de gjorda förändringarna i processutformningen i försökslinjen har givit ett positivt resultat.

Under den period som redovisas i tabell 7-3 var fosforhalten ut från (försöks) linje 1 visserligen lägre än ut från (kontroll) linje 2, men betydligt bättre resultat har uppmätts.

Detta framgår av figur 7-3, där halten fosfatfosfor ut från linjerna 1 och 2 mätta med den automatiska analysatorn visas för några dygn runt månadsskiftet april-maj 2004. Mycket låga fosfatfosforhalter uppmättes ut från försökslinjen, men skillnaden mellan linjerna 1 och 2 var ungefärligen densamma som den som visas i tabell 7-3. Om man antar att hela mängden bildat fosfatfosfor i slamhydrolysvolymer (zon 1) i försökslinjen (linje 1) skett med hjälp av vid hydrolysen bildat VFA och att också det med returslammet recirkulerade nitraten denitrifierats med bildat VFA erhålls en VFA-produktion på ca 0,01 g COD/(g COD·d). Den organiska slamhalten i zon 1 har här räknats om till COD. Detta är något lägre än det värde på 0,018 g COD/(g COD·d) som uppges av Petersen (2002).

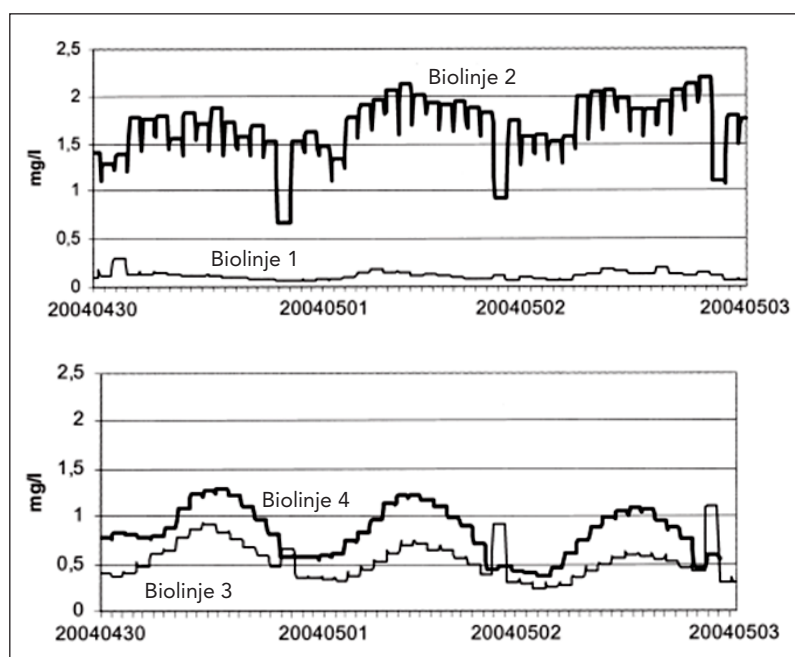
Också biolinjerna 3 och 4 är identiskt utformade med undantag för de ändringar i flödesriktningar som gjorts i linje 3 för att erhålla hydrolys av returslammet. En direkt jämförelse för att se vilken effekt slamhydrolysen har på resultatet bör därför kunna göras. Försöksresultaten (tabell 7-3) visar emellertid ingen väsentlig skillnad mellan linjerna. Ett litet fosfor-släpp kan anas i zon 2 i försökslinjen (linje 3), där det försedimenterade vattnet leds in. I volymer för slamhydrolys (zon 1) skedde ingen ökning av fosfathalten. I kontrollinjen (linje 4) skedde en

Tabell 7-3 Analysresultat för linjerna 1 och 2 för perioden 030516–031118 (10 provdygn) samt för linjerna 3 och 4 för perioden 031125–040115 (4 provdygn). Halter i mg/l. (Halter i ofiltrerade prov betecknas "of" och i filtrerade prov "f". Filtrering har skett med filterpapper Whatman GFA.)

	Biolinje 1 Försökslinje	Biolinje 2 Kontrolllinje	Biolinje 3 Försökslinje	Biolinje 4 Kontrolllinje
COD <sub>of</sub> försed.	300	300	232	232
COD <sub>f</sub> försed.	140	130	132	132
COD <sub>of</sub> biosed.	35	30	25	24
COD <sub>f</sub> biosed.	30	25	27	25
P <sub>of</sub> försed.	8,3	8,8	5,2	5,2
P <sub>of</sub> biosed.	1,6	3,0	0,4	0,6
PO <sub>4</sub> -P försed.	4,2	4,4	2,4	2,4
PO <sub>4</sub> -P zon 1	13,2	7,4	0,74	2,6
PO <sub>4</sub> -P zon 2	14,4	7,9	3,6	1,1
PO <sub>4</sub> -P biosed.	1,1	2,5	0,3	0,5
N-tot försed.	47	45	35	35
N-tot biosed.	10,5	10,4	11	9
NO <sub>3</sub> -N försed.	0,4	0,5	0,5	0,5
NO <sub>3</sub> -N biosed.	8,8	9,3	9,8	7,5
VFA försed. <sup>1</sup>	11	11	11	11
VFA zon 1 <sup>1</sup>	5,8	4,0	5,7	3,0
VFA zon 2 <sup>1</sup>	3,4	1,2	3,5	1,2

<sup>1</sup> Medelvärde av fyra mätningar, där proven uttagits som stickprov och analysen skett på filtrerade prov. Analysen har skett enligt en metod beskriven av Jönsson (1995).

viss ökning av fosfathalten i zon 1, där det försedimenterade vattnet leds in. Ett fortsatt fosforsläpp kan naturligtvis ha skett i både linje 3 och 4 i de senare anoxzonerna, där fosfathalten inte mättes. Nitrathalten har troligen varit mycket låg i dessa zoner. Under en period i månadskiftet april–maj 2004 var skillnaden mellan linjerna några tiondels mg/l till försökslinjens fördel (figur 7-3).



Figur 7-3 Uppmätta halter totalfosfor med den automatiska analysatorn efter biosedimenteringarna i linjerna 1–4. Linjerna 1 och 3 var försökslinjer.

Trots att något klart fosforsläpp inte kunde ses i linjerna 3 och 4 är de halter fosfatfosfor och totalfosfor som uppmättes i utgående vatten från biosedimenteringarna lägre än motsvarande halter ut från biolinjerna 1 och 2. Någon förklaring till detta kan inte ges med hjälp av analysresultaten. Fosforhalten i det försedimenterade vattnet som belastar linjerna 3 och 4 var dock väsentligt lägre än motsvarande halt i vattnet in till linjerna 1 och 2. Biolinjerna 3 och 4 var också drygt 20 % lägre belastade med kväve, vilket skulle kunna innebära att nitraten »tagit slut» i anox-zonerna och anaeroba förhållanden uppstått. Detta förklarar dock inte varför inget fosforsläpp uppmättes i slamhydrolysen (zon 1). Försöken med linjerna 3 och 4 skedde under relativt kort tid, ca 1 1/2 månad, och de presenterade resultaten är medelvärden av endast fyra provtagningar. Provtagningar under sommaren och början av hösten 2004 visade en något större skillnad, men den var fortfarande väsentligt mindre än mellan linjerna 1 och 2.

## 7.6 Slutsatser – Hydrolys av returslam

Följande slutsatser kan dras av de resultat som erhållits under försöken:

- Ett system för hydrolys av returslam för att öka tillgången på VFA är mycket enkelt. Försöken visade att inga som helst driftsproblem eller andra problem, t.ex. med lukt, kunde hänföras till slamhydrolysen.
- Målet med systemet är att öka tillgången på VFA. Någon ökning av denna halt kunde inte ses, vare sig i volymen för slamhydrolys eller i efterföljande anaerob volym. Detta var emellertid väntat, eftersom bildat VFA snabbt tas upp av bio-P- bakterier. (Alternativt, i system för enbart kväveavskiljning, förbrukas VFA vid denitrifikation om nitrat finns närvarande.)
- En klart positiv effekt av slamhydrolysen kunde ses i den försökslinje som byggdes om först. En tydlig effekt kunde ses i såväl volymen för slamhydrolys som i den första anaeroba volymen. Detta resulterade i en lägre fosforhalt ut från försökslinjen än från kontrollinjen.
- Belastningen på bioprocessen påverkar effekten av att införa ett system med hydrolys av returslammet. Också bioprocessens fysiska utformning påverkar. Hur denna påverkan skett och varför så olika resultat erhållits i de fysiskt olika utformade biolinjerna vid Källbyverket är inte klarlagt. Fortsatta mätningar kan förhoppningsvis ge svar på en del av de frågor som uppstått.
- Doseringen av fällningskemikalier i efterfällningen styrs av mätning av halten fosfor efter den biologiska reningen. En försiktig beräkning av den ekonomiska vinsten av en lägre kemikaliedosering och lägre mängd kemslam baserat på de resultat som uppnåddes under försöken visar att en besparing på ca 200 000 kr/år skulle kunna uppnås.
- Som ett resultat av den positiva effekten av ombyggnaden av linje 1 har beslut fattats att linje 2 också skall byggas om för hydrolys av returslammet. Däremot avvaktar man innan beslut fattas om ombyggnad av linje 4 till dess en förklaring till den lilla skillnaden mellan den ombyggda linje 3 och den icke ombyggda linje 4 kan ges.

- Det finns ett mycket klart samband mellan förhållandena i ledningssystemet och fosforavskiljningen i den biologiska reningsprocessen. Detta har kunnat observeras under flera år. Det är av största intresse att sambandet mellan ledningssystem och reningsprocess klarläggs.

## 8 Slutsatser

Erfarenheterna från experiment med kombinerad biologisk fosforavskiljning och kemisk fällning visar att det viktigaste är att den biologiska fosforavskiljning utnyttjar inkommande VFA på bästa möjliga sätt så att konkurrensen om VFA mellan PAO och GAO inte förändras till fördel för GAO och på så vis att behovet av kemikalier är så lågt som möjligt. Intermittent dosering är bäst om villkoren för biologisk fosforavskiljning generellt är bra och bara kortare perioder med VFA-brist förekommer. Om kontinuerlig dosering är nödvändig går bio-P och simultanfällning att kombinera, bäst om kemikaliedoseringen sker mellan den aktiva slamtanken och sedimentationstanken på ett sådant sätt att den biologiska processen fungerar med minsta möjliga påverkan från kemikalierna. Kombinationen går självklart lättast om processerna skiljs helt så att kemikalierna används i en efterfällningsanläggning eller som stöddosering i ett filter.

Bio-P-processen kan drivas med kontinuerlig dosering av järn utan stora problem om järndosen inte är för hög. Doseringen kan vara nödvändig för att säkerställa låga utgående halter av fosfor; men utöver kostnaderna för kemikalier och extra slambehandling reduceras slamets kapacitet för biologisk fosforavskiljning.

Hydrolys av returslam för att öka tillgången på VFA är mycket enkelt. Försök på Källbyverket i Lund visade inga som helst driftsproblem eller andra problem, t.ex. med lukt, som kunde hänföras till slamhydrolysen. En försiktig beräkning av den ekonomiska vinsten av en lägre kemikaliedosering och lägre mängd kemslam baserat på de resultat som uppnåddes under försöken visar att en besparing på ca 200 000 kr/år skulle kunna uppnås.

## 9 Referenser

- Amann R. I. (1995) In situ identification of micro-organisms by whole cell hybridization with rRNA-targeted nucleic acid probes. *Mol. Microbial Ecol. Man.* 3.3.6: 1–15, Kluwer Academic Publishers.
- Barnard J. L. och Scruggs C. E. (2003) Biological phosphorus removal. Secondary release and GAOs can be your hidden enemies. *Wat. Env. Tech.* 15(2), 27–33.
- Bond P.L., Erhart R., Wagner M., Keller J. och Blackall L. L. (1999) Identification of some of the major groups of bacteria in efficient and nonefficient biological phosphorus removal activated sludge systems. *Appl Env. Microbiol.* 65(9), 4077–4084.
- Borglund A. M. (2004) Kombinerad kemisk och biologisk fosforering på Käppalaverket, Lidingö – en studie ur ett processtekniskt, mikrobiologiskt och ekonomiskt perspektiv. VA-Forsk projekt 2004-6.
- Christensson, M., Lie, E., Jönsson, K., Johansson, P. och Welander, T. (1998) Increasing substrate for polyphosphate accumulating bacteria in municipal wastewater through hydrolysis and fermentation of sludge in primary clarifiers. *Wat. Env. Res.*, Vol. 70. 138–145.
- Henze, M., Harremoës, P., Jansen, J. la C. och Arvin, E. (1997) Wastewater treatment; Biological and chemical processes (2nd Ed.). Springer Verlag, Berlin.
- Jönsson, L-E. (1995) Analysis of VFA – A simple titration procedure. VATTEN 51: 300-303.
- Petersen, G. (2002) Biologisk slamhydrolyse af aktiv slam. (på danska) Spildevandsteknisk tidskrift, Blad 4.
- Saunders A. M., Oehmen A., Blackall L. L., Yuan Z. och Keller J. (2003) The effect of GAOs (glycogen accumulating organisms) on anaerobic carbon requirements in full-scale Australian EBPR (enhanced biological phosphorus removal) plants. *Wat. Sci. Tech.* 47(11), 37–43.
- Särner, E., Jonasson C. och Petersson M. (2004) Hydrolyse av Returslam för Förbättrad Biologisk Fosforavskiljning. VATTEN 60: 231–238.
- Tykesson, E och Jansen, J. la Cour. (2005) Evaluation of Laboratory Batch Tests for Enhanced Biological Phosphorus Removal. Utvärdering av laboratoriebatchförsök för biologisk fosforavskiljning. VATTEN 61: 43-50.
- Tykesson, E. (2005) Enhanced Biological Phosphorus Removal Processes, competing substances and tools for operation of wastewater treatment plants. Doktorsavhandling TVVA-1008, ISBN: 91-628-6478-5, Lunds Tekniska Högskola.

Tykesson, E. (2002) Combined biological- and chemical phosphorus removal in wastewater treatment – Swedish experience and practical application of phosphorus release batch test. Licentiatavhandling TVVA-3007, ISSN:1650-5050, Lunds Tekniska Högskola.





Box 47607, 117 94 Stockholm  
Tel 08 506 002 00  
Fax 08 506 002 10  
E-post [svensktvatten@svensktvatten.se](mailto:svensktvatten@svensktvatten.se)  
[www.svensktvatten.se](http://www.svensktvatten.se)