

# ETablering av biologisk fosforavskiljning i mindre reningsverk

## Establishment of enhanced biological phosphorus removal in smaller wastewater treatment plants

av DAVID GUSTAVSSON<sup>1</sup>, JES LA COUR JANSEN<sup>2</sup> och CARL DAHLBERG<sup>3</sup>

<sup>1</sup> VA-verket, Malmö stad, S-250 80 Malmö

e-post: David.Gustavsson@malmo.se

<sup>2</sup> VA-teknik, Institutionen för Kemiteknik, Lunds Universitet, Box 124, S-221 00 Lund

e-post: Jes.la\_Cour\_Jansen@vateknik.lth.se

<sup>3</sup> Tekniska kontoret, Gislaveds kommun, S-332 80 Gislaved

e-post: Carl.Dahlberg@gislaved.se



### Abstract

Enhanced biological phosphorus removal (EBPR) of municipal wastewater is not a common treatment method in Sweden. An explanation could be insufficient knowledge about the EBPR process. This article aims to increase the knowledge by describing how to establish and evaluate enhanced phosphorus removal in smaller wastewater treatment plants. The phosphate accumulating organisms, PAO, demand an alternately anaerobic and aerobic/anoxic environment and a carbon source in the state of volatile fatty acids (VFA). A sufficient anaerobic retention time is needed, nitrate recirculation to the anaerobic zone should be minimized and too much aeration and secondary phosphorus release should be avoided. Measurements of phosphorus content in biological sludge and phosphorus release tests can be used to evaluate the EBPR process. Smålandsstenar Wastewater Treatment Plant in southern Sweden is described as an example of a plant where an establishment of EBPR has been made.

*Key words* – wastewater treatment, enhanced biological phosphorus removal

### Sammanfattning

Biologisk fosforavskiljning av kommunalt avloppsvatten har fortfarande inte slagit igenom i Sverige. En förklaring kan vara bristande kunskaper om bio-P-processen. Denna artikel tar upp vad man bör tänka på och göra när man ska etablera, men även utvärdera, biologisk fosforavskiljning i ett mindre reningsverk. De fosfatackumulerande organismerna, PAO, kräver en växelvis anaerob och aerob/anoxisk miljö och kolkälla i form av VFA. En viss anaerob uppehållstid krävs, nitratrecirkulation till den anaeroba zonen bör minimeras och för häftig luftning och sekundärt fosforläpp bör undvikas. Mätning av fosforinnehållet i överskottslammet och fosforläppförsök utvärderar bio-P-processen. Smålandsstenar avloppsreningsverk i södra Sverige beskrivs som ett exempel på ett verk där en etablering av biologisk fosforavskiljning har skett.

### Inledning

Kemisk avskiljning är fortfarande den vanligaste metoden för att avskilja fosfor i kommunala avloppsreningsverk i Sverige. Att biologisk fosforavskiljning ännu inte har etablerats beror troligen på bristande kunskaper om den biologiska metoden, men också på den kemiska me-

todens relativa enkelhet. När bio-P-processen gynnas, minskar eller försvinner kemikalieanvändningen och slamproduktionen minskar vilket både ger en ekonomisk vinst och en mer miljöanpassad drift. Dessutom har bio-P-slammet visat sig ha bättre slamegenskaper än kemslammet (Andersson, 2005). Ett problem hos svenska reningsverk är dock att det ofta råder brist på

lättnedbrytbara organiska ämnen i det inkommande avloppsvattnet, vilket är en förutsättning för en fungerande bio-P-process. Utökad slamhydrolys har dock visat sig vara en god metod för att öka mängden tillgänglig kol-källa.

Förutsättningarna för att etablera biologisk fosforavskiljning skiljer sig mellan stora och mindre reningsverk. Stora verk har ofta möjligheten att driva försökslinjer och att satsa mer pengar på utrustning och övervakning. Mindre verk har mindre resurser och därför kan en etablering vara något svårare där. Viktigast av allt är dock att kunskapen om hur bio-P-processen fungerar finns. Denna artikel tar upp vad man bör göra och tänka på när man ska etablera, men även utvärdera, biologisk fosforavskiljning i ett reningsverk, med fokus på mindre verk. Artikelns kan uppfattas som en enkel manual. Smålandsstenar avloppsreningsverk, beläget i Gislaveds kommun i södra Sverige, har använts som ett exempel i studien.

## Biologisk fosforavskiljning

Biologisk fosforavskiljning sker egentligen i alla verk med biologisk rening genom assimilerings. I slutet av 50-talet rapporterades det om ett så kallat biologiskt lyxupptag av fosfor när man såg att mer fosfor togs upp än vad som krävdes vid enbart assimilering (Janssen *et al.* 2002). Den mikrobiologiska och biokemiska bakgrunden bakom detta fenomen var dock länge oklar. Idag tycker man sig veta hur denna utökade biologiska fosforavskiljning fungerar. En grupp som kallas fosfatakkumulerande organismer, PAO, är de bakterier som ansvarar för den så kallade bio-P-processen. Två olika miljöer krävs, dels en anaerob och dels en aerob eller anox. Under anaeroba förhållanden har PAO förmågan att ta upp lättflyktiga fettsyror, VFA (Volatile Fatty Acids), vilka lagras som polyhydroxyalkanoater (PHA). VFA-upptaget är möjligt på grund av att energi erhålls genom hydrolys av lagrad polyfosfat i bakteriernas cell. Ett fosforsläpp i form av ortofosfat sker till omgivningen. Under aeroba eller anoxa förhållanden används syre respektive nitrat för att kunna omvandla PHA till den kol-källa och energi som behövs vid tillväxt och vid påfyllning av polyfosfatlagret. Ett nettoupptag av ortofosfat ses och fosfor avskiljs genom slamuttag. Vanliga heterotrofer kan inte ta upp VFA i anaeroba miljöer vilket ger PAO en konkurrensfördel. En mer noggrann beskrivning av bio-P-processen kan hittas bland annat i Tykesson (2005).

Efter en del misslyckanden i vissa verk med »rätta» förhållanden, upptäcktes ännu en grupp som var kapabla att ta upp VFA i denna miljö, så kallade glykogenakkumulerande organismer, GAO. GAOs metabolism är i

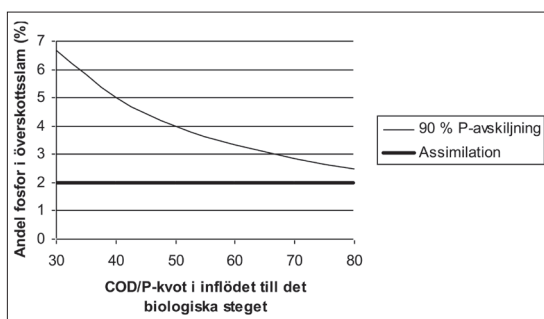
stort sett densamma som PAOs. Den stora skillnaden är att GAO använder sig av glykogen som energikälla i den anaeroba miljön (Satoh *et al.* 1994) och bidrar därmed inte till något fosforupptag.

## Etablering

Etablering av utökad biologisk fosforavskiljning borde vara önskvärt i samtliga verk. Förutsättningarna är dock olika för varje enskilt verk. Avloppsvattnets sammansättning varierar men även tillgängliga volymer, ekonomiska förutsättningar, utsläppskrav etc är olika. Idag bör dock samtliga nybyggda verk kunna innehålla utökad biologisk fosforavskiljning om kunskapen om bio-P-processen finns. Nedan följer ett antal faktorer som man bör undersöka och tänka på när man vill etablera men även optimera en bio-P-process.

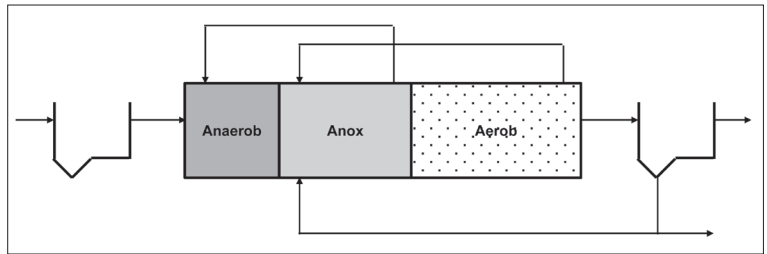
## Karakterisering av avloppsvattnet

En karakterisering av inkommande avloppsvattnet är viktig. Bio-P-processen är starkt beroende av att en tillräcklig mängd VFA, främst i form av ättiksyra och propionsyra, flödar in till eller hinners produceras i reningsverkets anaeroba del. Minst 10–20 mg ättiksyra krävs för att avskilja 1 mg fosfor biologiskt (Abu-ghararah & Randall 1991; Christensson *et al.* 1995). En relativt enkel metod för VFA-bestämning, den så kallade fempunktstitreringsmetoden, finns beskriven i Jönsson (1995). Data om inkommande VFA-halter saknas dock oftast. En COD/P-kvot är ofta känd och Fig. 1 kan då användas för att uppskatta hur mycket fosfor som måste tas upp biologiskt för att få en god reningsgrad vid olika COD/P-kvoter. En GAO-population i slammet ökar mängden behövd VFA för fosforavskiljning, vilket också tillförsel av nitrat och syre till den anaeroba bassängen

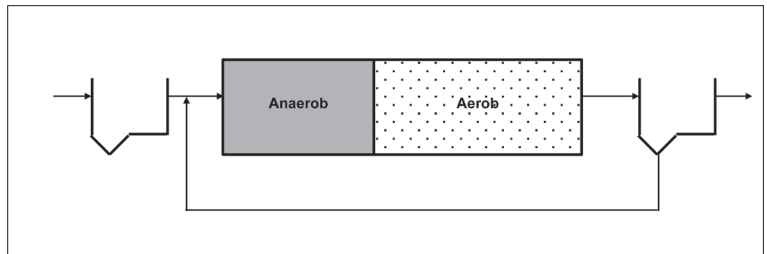


Figur 1. Nödvändigt fosforinnehåll (i vikt-%) i överskottsslammet vid 90 % fosforavskiljning vid olika COD/P-kvoter.

Figur 2. UCT-processen. Modifierad från Tykesson (2002).



Figur 3. A/O-processen. Modifierad från Tykesson (2002).



gör. Inkommande halter av fosfor, VFA/COD, syre och nitrat bör alltså studeras. Dagn- och säsongsvariationer är viktiga.

Bio-P-processen har visat sig fungera vid låga temperaturer, vilket borde passa svenska reningsverk. Exempelvis konstaterade Erdal *et al.* (2003) att temperaturer på 10°C eller lägre gynnar PAO i förhållande till icke-PAO.

Kalium och magnesium samt eventuellt kalcium fungerar som motjoner vid fosfatupptag. Det är tänkbart att magnesiumbrist förekommer i vissa avloppsvatten. Imai *et al.* (1988) fann att ett magnesiuminflöde på över 8 mg Mg/l förbättrade bio-P-processen.

### Tillgängliga volymer

I ett konventionellt verk med krav på kväveavskiljning, finns idag aktivslambassänger med anoxa och aeroba volymer. Om en etablering av biologisk fosforavskiljning ska ske, krävs även anaeroba volymer. Kanske står någon bassäng tom, eller så krävs en tillbyggnad. Vid fördenitrifikation kan den anoxa zonen delas upp i mindre bassänger så att recirkulationsströmmen inte leds till den första bassängen och på så vis skapa en anaerob zon.

Om inkommande avloppsvatten har brist på VFA, kan ökad slamhydrolys av primär- eller överskottslam vara en lösning. Denna kan ske i externa tankar, vilket kräver ytterligare volymer, eller genom ökad uppehållstid i den anaeroba zonen. I Öresundsverket i Helsingborg används en primärslamhydrolys som består i att slamets uppehållstid i försedimenteringsbassängen ökas och VFA, som bildas i slamtacket, tvättas ur genom en rundpumpning av slammet (Christensson *et al.* 1995). Extern tillsats av kolkälla till exempel i form av glukos

och etanol har också visat sig fungera. Det är dock inte önskvärt att ersätta fällningskemikalier med en annan kemikalie, om nu inte kolkällan finns lättillgänglig.

### Konfiguration

Efter att ha karakteriserat avloppsvattnet och inspekterat tillgängliga volymer, bör man titta på vilka driftsvårigheter som kan uppkomma och vilken konfiguration som är lämplig. I konfigurationer med fördenitrifikation följer alltid en viss mängd nitrat med i returslammet, vilket ger en försämrad bio-P-process. Returslammet bör därför istället pumpas till den anoxa bassängen och en recirkulationsström från den anoxa till den anaeroba bassängen läggs till för att recirkulera det aktiva slammet. Returslammet och recirkulationsströmmen från den aeroba bassängen pumpas in i början av den anoxa bassängen medan recirkulationsströmmen till den anaeroba bassängen tas ifrån slutet av den anoxa bassängen där nitrathalten bör vara väldigt låg. Denna konfiguration kallas UCT (University of Cape Town), Fig. 2. Fördenitrifikation är att föredra eftersom vissa PAO kan denitrifiera. Fler fullskalförsök måste dock utföras för att kunna utvärdera om PAOs signifikant bidrar med denitrifikation.

Saknas krav på kväveavskiljning, ska den aeroba slamåldern vara kort för att förhindra nitrifikation. Aspegren (1995) såg genom pilotförsök att den aeroba slamåldern måste vara minst 2,5 dagar vid 10°C för att få en väl fungerande bio-P-process med en A/O-konfiguration, Fig. 3.

Vilken syre- eller nitrathalt som krävs för ett bra fosforupptag är inte beskrivet i litteraturen. Christensson (1997) konstaterar att när biologisk kväveavskiljning

tillämpas tillsätts sådana mängder syre att ett fosforupptag av PAO sker. Allt för häftigt luftning, som vid låg organisk belastning som under helger, semestertider och vid hög hydraulisk belastning under längre perioder av regn, är inte bra för bio-P-processen. Då försvinner bakteriernas lager av PHA för snabbt (Brdjanovic *et al.* 1998) och utan PHA kan ingen fosfor tas upp.

Den anaeroba uppehållstiden som krävs beror bland annat på hur stor mängd lättnedbrytbart organiskt material som finns och kan bildas i avloppsvattnet samt den mängd fosfor som ska avskiljas. En anaerob fraktion mellan 10 % och 25 % av den totala volymen rekommenderades av Ekama *et al.* (1984), beroende på COD-belastning. Sheer & Seyfried (1997) såg dock endast en liten ökning av fosforavskiljningen när den anaeroba fraktionen ökades från 15 % till 25 %.

Ett sekundärt fosforsläpp kan ske om PAO utsätts för anaeroba förhållanden utan att VFA finns tillgängligt (Barnard & Scruggs 2003). Detta fosforsläpp sker för att ge cellen energi så att den kan upprätthålla sina funktioner. När ingen VFA tas upp finns heller ingen energi för att kunna ta upp fosfor i den anoxa/aeroba miljön. Brist på VFA i en anaerob miljö kan också hittas i den anoxa bassängen när nitraten är slut, i sedimenteringsbassänger samt i röt-kammare.

### Slamhantering

PAO släpper fosfor under anaeroba förhållanden, vilket kan ge ett rejektvatten med höga fosforhalter vid slambehandlingen av överskottsslam. Anaerob stabilisering bör därför undvikas i de flesta fall. Snabb och mekanisk behandling är att föredra.

### Uppföljning/Kontroll

Mäter man fosforinnehållet i överskottslammet kan man bedöma om en utökad biologisk fosforavskiljning sker. Assimilering leder till en fosforhalt på cirka 2 % av torrsubstansen i överskottslammet. Vid fungerande utökad biologisk fosforavskiljning består minst 3–5 % av torrsubstansen utav fosfor (Janssen *et al.* 2002).

Det finns idag ingen standardiserad eller generellt accepterad metod, för att undersöka hur väl PAO fungerar i ett avloppsreningsverk. Tykesson (2005) föreslog dock fosforsläppförsök, som har använts på Avdelningen för VA-teknik vid Lunds Tekniska Högskola, som en bra metod. Den maximala fosforsläpphastigheten per gram VSS (Volatile Suspended Solids) anses vara den parameter som är bäst att jämföra mellan olika försök. Janssen *et al.* (2002) klassificerade fosforsläpphastigheter. Hastigheter mellan 3–7 mg P/(g VSS\*h) ansågs motsvara en god bio-P-process. Högre hastigheter tyder på en mycket god process. Öresundsverket i Helsingborg

har uppvisat mycket goda fosforsläpphastigheter på upp till 17 mg P/(g VSS\*h). En P/VFA-kvot på mycket mindre än 0,5 g släppt P/g upptagen ättiksyra kan tyda på att GAOs finns närvarande, eftersom det då tas upp mer ättiksyra än vad som behövs för bio-P-processen (Barnard & Scruggs 2003).

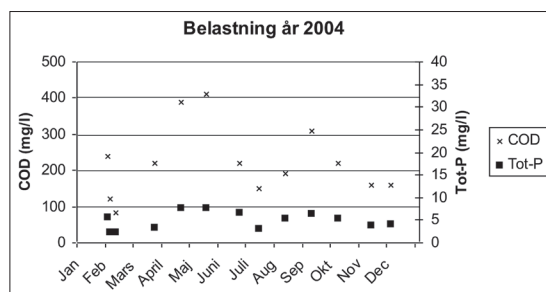
Onlinemätningar av olika koncentrationer är naturligtvis önskvärt. Detta är dock ofta inte ett alternativ för mindre verk, där det ännu inte är ekonomiskt fördelaktigt. Mätning av ingående och utgående fosforhalter kan påvisa behovet av VFA respektive efterfällning. En redoxmätare i den anoxa zonen kan bedöma hur stor nitratrecirkulationen är och om det finns risk för sekundärt fosforsläpp.

### Kemikaliedosering som supplement

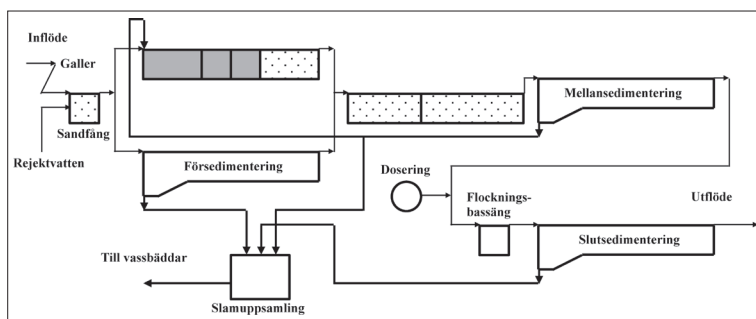
Om utsläppskraven för fosfor inte uppnås med enbart biologisk avskiljning, måste kemikaliedosering användas som supplement. Efterfällning och att kemslammet separeras från returslammet är att föredra. Om fällningskemikalier blandas in i de biologiska bassängerna kommer dessa att konkurrera med PAO om fosfor, vilket missgynnar bio-P-processen. Det bör också påpekas att de ingående mängderna fosfor i svenska kommunala avloppsreningsverk redan är förhållandevis låga.

### Smålandsstenar avloppsreningsverk

Smålandstenar avloppsreningsverk ligger i Gislaveds kommun i Småland. Idag är cirka 4500 personekvivalenter anslutna till verket, som är helt förlagt inomhus förutom tillhörande vassbäddar. Medelflödet in till verket är cirka 2100 m<sup>3</sup>/dag. Avloppsvattnet kommer främst från hushåll. Verket måste uppnå minst 90 % rening när det gäller BOD<sub>7</sub> och fosfor men inget krav på kväve-rening finns. Riktvärden i utgående vatten är 10 mg BOD<sub>7</sub>/l och 0,5 mg P/l. Belastning av COD och totalfosfor under år 2004 ses i Fig. 4. I slutet av februari 2004



Figur 4. Belastning av COD och total-P under år 2004 vid Smålandsstenar avloppsreningsverk.



Figur 5. Förenklat processchema över Smålandsstenar avloppsreningsverk. Gråa och prickiga bassänger är anaeroba respektive aeroba.

skedde en ändring av verkets konfiguration för att gynna biologisk fosforavskiljning och därigenom minska kemikalieanvändningen. Tidigare stod ett par bassänger tomma, hela den biologiska volymen var luftad och allt inkommande avloppsvatten försedimenterades. Ändringen bestod i att alla bassänger idag utnyttjas och att även anaeroba volymer ingår i konfigurationen. Dessutom tillåts en del av det inkommande vattnet (ca 30 %) gå direkt in i de biologiska bassängerna utan att genomgå försedimentering. Den anaeroba volymfraktionen av den totala aktivslamvolymen är 31 %. Allt returslam pumpas till den första anaeroba bassängen. De aeroba bassängerna håller cirka 0,8 mg O<sub>2</sub>/l förutom den första aeroba bassängen där en mindre mängd luft tillsätts. Riktvärdet för SS (Suspended Solids) i de två sista aeroba bassängerna är 4,0 g SS/l. Dagens processchema ses i Fig. 5 och anläggningsdata finns i Tab. 1.

Efterfällning sker med ett polyaluminiumkloridbaserat fällningsmedel, Ekoflock 71. Kemikaliedosering regleras manuellt dagligen genom att mäta siktdjupet med en Secchi-skiva i slutet av slutsedimenteringsbassängen. För dålig sikt gör att kemikaliedoseringen ökas och tvärtom. Vid eventuell slamflykt ökas alltså doseringen för att förhindra att partikulärt fosfor släpps ut. Mängden utsläppt ortofosfat reglerar därmed inte doseringen, vilket gör att en överdosering lätt sker när vattnet har bra siktdjup. Allt primärslam, överskottslam och kemslam blandas i en tank och pumpas sedan till vassbäddar. Rejektvattnet från vassbäddarna innehåller mycket låga aluminiumhalter och därför kan det antas att fällningskemikalier inte förs in i de biologiska bassängerna. Rejektvattnet bidrar med mindre än 10 % av det totala medelinflödet till verket och nästan alla ämneskoncentrationer är lägre än i inflödet.

Det första året med biologisk fosforavskiljning kännetecknades av mycket driftstopp på grund av problem med omrörare och annan utrustning. Under 2004 sågs därför inte någon nämnvärd förändring av kemikalieåtgången. I november 2005 verkar det dock som om åtgången under 2005 har minskat med 40–50 % jämfört med tidigare år.

Under våren 2005 utvärderades bio-P-processen i ett examensarbete (Gustavsson 2005). Tillgången på driftsdata var bristfällig, som vid alla mindre verk. Under en månads tid i mars–april gjordes provtagning av inkommande avloppsvatten för analys av VFA-koncentration. Provtagningen skedde vid elva tillfällen mellan klockan 10.00–15.40. Inget utav proverna kunde påvisa någon VFA-koncentration. Även om mätillfällena var få, kan det antas att den ingående VFA-mängden är ringa.

COD/P-kvoten i det inkommande avloppsvattnet är låg med värdet 43, vilket innebär att mer än hälften av inkommande fosfor måste avskiljas genom bio-P-processen om kemikaliedosering helt ska undvikas, se Fig. 1. Nitratrecirkulationen till den anaeroba zonen är låg, under 1 mg/l. Nitrifikationen missgynnas genom låg syresättning.

Den genomsnittliga maximala fosforsläpphastigheten i sammanlagt fyra fosforsläppförsök var 3,7 mg P/(g VSS\**h*), vilket tyder på en god bio-P-process. Simulering i DHI:s EFOR (2003) antydde att verket kan nå utsläppsvärden på under 0,7 mg P/l med enbart biologisk fosforavskiljning, således krävs kemikaliedosering som supplement. Den goda biologiska fosforavskiljningen

Tabell 1. Anläggningsdata för Smålandsstenar avloppsreningsverk.

Anläggningsdel	Antal	Volym, m <sup>3</sup>	Yta, m <sup>2</sup>
<b>Mekanisk rening</b>			
Galler	1	–	0,3
Sandfång	1	62	18
Försedimentering	1	370	107
<b>Biologisk rening</b>			
Anaeroba bassänger	3	204	58
Aeroba bassänger	3	454	107
Mellansedimentering	2	630	214
<b>Kemisk rening</b>			
Flockningsbassänger	2	132	38
Slutsedimentering	2	928	290

beror inte på VFA i inflödet eller på en hög COD/P-kvot. Låg nitratrecirkulation tillsammans med mycket god slamhydrolys av icke-försedimenterat avloppsvatten och returslam bidrar troligen till den goda bio-P-processen. Den höga anaeroba volymfraktionen gör att VFA hinner att produceras.

Gustavsson (2005) genomförde också slamhydrolysförsök i labbskala. Försöken påvisade hög VFA-produktion i både primär- och returslam med något snabbare produktion i primärslammet. Hydrolys av returslammet gav mycket förhöjda koncentrationer av fosfor. Under år 2006 kommer även primärslam börja pumpas till den anaeroba zonen för att öka den interna VFA-produktionen.

## Slutsatser

- Biologisk fosforavskiljning kräver en växelvis anaerob och aerob/anoxisk miljö och kolkälla i form av VFA.
- Det är viktigt att undvika nitratrecirkulation till den anaeroba zonen, sekundärt fosforsläpp och för häftig luftning för att bio-P-processen ska fungera.
- Mätning av fosforinnehållet i överskottslammet och fosforsläppförsök utvärderar bio-P-processen.
- Smålandsstenar avloppsreningsverk har, genom en ändring av konfigurationen, lyckats gynna den biologiska fosforavskiljningen och minskat kemikalieanvändningen.

## Tack

Artikeln grundar sig på ett examensarbete gjort av David Gustavsson på Avdelning för VA-teknik vid LTH i samarbete med Gislaveds kommun. Ett stort tack riktas till Gerd Persson, Ylva Persson och Mona Wretling-Hamrin på VA-labbet på LTH.

## Litteratur

- Abu-ghararah, Z. H. & Randall, C. W., 1991. The effect of organic compounds on biological phosphorus removal. *Wat. Sci. Tech.* 23:4–6, 585–594.
- Andersson, B., 2005. Studie av sedimentation och avvattnings av slam från reningsverk med biologisk fosforreduktion. Avd. för VA-teknik, LTH. (Examensarbete.)
- Aspegren, H., 1995. Evaluation of a high loaded activated sludge process for biological phosphorus removal. Avd. för VA-teknik, LTH. (Doktorsavhandling.)
- Barnard, J. L. & Scruggs, C. E., 2003. Biological phosphorus removal – Secondary release and GAOs can be your hidden enemies. *Wat. Env. Tech.* 15:2, 27–33.

- Borglund, A. M., 2004. Kombinerad kemisk och biologisk fosforrening på Käppalaverket, Lidingö – En studie ur ett processtekniskt, mikrobiologiskt och ekonomiskt perspektiv. VA-Forskrappport 2004-06.
- Brdjanovic, D., Slamet, A., van Loosdrecht, M. C. M., Hooijmans, C. M., Alaerts, G. J. & Heijnen, J. J., 1998. Impact of excessive aeration on biological phosphorus removal from wastewater. *Wat. Res.* 32:1, 200–208.
- Christensson, M., 1997. Enhanced biological phosphorus removal – Carbon sources, nitrate as electron acceptor, and characterisation of the sludge community. Avd. för Bioteknik, Lunds Universitet. (Licentiatuppsats.)
- Christensson, M., Jönsson, K., Lee, N., Lie, E., Johansson, P., Welander, T. & Østgaard, K., 1995. Utvärdering av biologisk fosforavskiljning vid Öresundsverket i Helsingborg – processtekniska och mikrobiologiska aspekter. VA-Forskrappport 93–111.
- Ekama, G. A., Marais, G. v. R. & Siebritz, I. P., 1984. Theory, design and operation of nutrient removal activated sludge processes. Water Research Commission, University of Cape Town, City Council of Johannesburg & National Institute for Water Research of the CSIR.
- Erdal, U. G., Erdal, Z. K. & Randall, C. W., 2003. The competition between PAOs (phosphorus accumulating organisms) and GAOs (glycogen accumulating organisms) in EBPR (enhanced biological phosphorus removal) systems at different temperatures and effects on system performance. *Wat. Sci. Tech.* 47:11, 1–8.
- Gustavsson, D. J. I., 2005. Biologisk fosforavskiljning – en studie av bio-P-processen och slamhydrolys samt en utvärdering av Smålandsstenar avloppsreningsverk. Avd. för VA-teknik, LTH. (Examensarbete.)
- Imai, H., Endoh, K. & Kozuka, T., 1988. Magnesium requirement for biological removal of phosphate by activated sludge. *J. of Fermentation Tech.* 66:6, 657–666.
- Janssen, P. M. J., Meinema, K. & van der Roest, H. F., 2002. Biological phosphorus removal – manual for design and operation. IWA publishing, London.
- Jönsson, L.-E., 1995. Analys av VFA – en enkel titrermetod. *Vatten.* 51:4, 300–303.
- Satoh, H., Mino, T. & Matsuo, T., 1994. Deterioration of enhanced biological phosphorus removal by the domination of microorganisms without polyphosphate accumulation. *Wat. Sci. Tech.* 30:6, 203–211.
- Sheer, H. & Seyfrid, C. F., 1997. Enhanced biological phosphate removal: modelling and design in theory and practice. *Wat. Sci. & Tech.* 35:10, 43–52.
- Tykesson, E., 2005. Enhanced biological phosphorus removal – Processes, competing substances and tools for operation of wastewater treatment plants. Avd. för VA-teknik, LTH. (Doktorsavhandling.)
- Tykesson, E., 2002. Combined biological- and chemical phosphorus removal in wastewater treatment – Swedish experience and practical application of phosphorus-release batch tests. Avd. för VA-teknik, LTH. (Licentiatuppsats.)