

# Omsättning av organiska ämnen i VA-system

*Henrik Aspegren  
Jes la Cour Jansen  
Mogens Henze  
Per Halkier Nielsen  
Natuschka Lee*



# VA-Forsk

VA-Forsk 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. FoU-avgiften är för närvarande 1,05 kronor per kommuninnevånare och år. Avgiften är frivillig. Nästan alla kommuner är med i programmet, vilket innebär att budgeten årligen omfattar drygt åtta miljoner kronor.

VA-Forsk initierades gemensamt av 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  
Avloppsvattenrening  
Ekonomi och organisation  
Utbildning och information

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

*Ola Burström*, ordförande

*Olof Bergstedt*

*Roger Bergström*

*Stefan Marklund*

*Mikael Medelberg*

*Peter Stahre*

*Jan Söderström*

*Göran Tägtström*

*Agneta Åkerberg*

Skellefteå

Göteborgs VA-verk

Svenskt Vatten AB

Luleå

Roslagsvatten AB

VA-verket Malmö

Sv kommunförbundet

Borlänge

Falkenberg

*Steinar Nybruken*, adjungerad

*Thomas Hellström*, sekreterare

NORVAR, Norge

Svenskt Vatten AB

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

VA-Forsk  
Svenskt Vatten AB  
Box 47607  
117 94 Stockholm  
Tfn 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)

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

|                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Rapportens titel:</b>        | Omsättning av organiska ämnen i VA-system                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Title of the report:</b>     | Conversion of organic matter in sewage systems                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Rapportens beteckning</b>    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Nr i VA-Forsk-serien:</b>    | 2003-45                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <b>ISSN-nummer:</b>             | 1102-5638                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>ISBN-nummer:</b>             | 91-85159-11-5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Författare:</b>              | Henrik Aspegren, Malmö Stad, VA-verket, Jes la Cour Jansen, Avdelningen för Vattenförsörjnings- och Avloppsteknik, Lunds Tekniska Högskola, Mogens Henze, Institut for Miljø og Ressourcer, Danmarks Tekniske Universitet, Per Halkier Nielsen, Afdelingen for Miljøteknik, Aalborg Universitet, Natuschka Lee, Lehrstuhl für Mikrobiologie, Technische Universität München                                                                                                                      |
| <b>VA-Forsk projekt nr:</b>     | 96-124                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <b>Projektets namn:</b>         | Omsättning av organiska ämnen i VA-system                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Projektets finansiering:</b> | VA-Forsk, VA-verket Malmö, Avdelningen för Vattenförsörjnings- och Avloppsteknik, Lunds Tekniska Högskola (LTH), Institut for Miljø og Ressourcer vid Danmarks Tekniske Universitet (DTU), European Environmental Research Organisation (EERO), Stiftelsen för Internationalisering av Högre Utbildning och Forskning (STINT)                                                                                                                                                                    |
| <b>Rapportens omfattning</b>    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Sidantal:</b>                | 30                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Format:</b>                  | A4                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Sökord:</b>                  | Biologisk fosforavskiljning, populationsdynamik, datorsimulering, pilot-anläggningar, slamålder, flyktiga fettsyror, glukos, upplagringsprodukter                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Keywords:</b>                | Biological phosphorus removal, population dynamics, computer simulation, pilot plants, sludge retention time, Volatile Fatty Acids (VFA), glucose, storage products                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <b>Sammandrag:</b>              | Två parallella aktivttslam-anläggningar i pilotskala har drivits för biologisk fosforavskiljning men med olika slamålder. Allmänna driftsparametrar har jämförts. Dessutom har datorsimuleringar samt studier av upplagringsprodukter och populationsdynamik utförts. Slammets sjunkegenskaper, utgående halt löst COD och utgående halt kväve visade sig påverkas främst av slamåldern medan den biologiska fosforavskiljningen påverkas främst av vattenkvaliteten.                            |
| <b>Abstract:</b>                | Two activated sludge pilot plants have been operated in parallel with biological phosphorus removal but with different sludge age. General operational characteristics have been compared. Further, computer simulations and studies of population dynamics and storage products have been performed. Settling properties, effluent dissolved COD and effluent nitrogen were affected mainly by the sludge age while the biological phosphorus removal was affected mainly by the water quality. |
| <b>Målgrupper:</b>              | Svenska reningsverk, konsulter, leverantörer, forskare                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <b>Omslagsbild:</b>             | Pilotanläggningen på Sjölanda reningsverk, Foto: Henrik Aspegren                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Rapporten beställs från:</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>            | 2003                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Utgivare:</b>                | Svenskt Vatten AB<br>© Svenskt Vatten AB                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |

## FÖRORD

I Sverige där kraven på fosforavskiljning, sett i ett internationellt perspektiv, är mycket långtgående har problem med driftstabilitet troligen varit en av de främsta orsakerna till att biologisk fosforavskiljning inte har fått ett riktigt genombrott. Denna studie initierades i syfte att belysa hur variationer i vattenkvalitet påverkar processresultat och biomassan i aktivt slamprocessen

Projektet genomfördes som ett samarbete mellan: VA-verket Malmö, Avdelningen för Vattenförsörjnings- och Avloppsteknik, Lunds Tekniska Högskola (LTH), Institut for Miljø og Ressourcer vid Danmarks Tekniske Universitet (DTU), Afdelingen for Miljøteknik, Aalborg Universitet och Lehrstuhl für Mikrobiologie, Technische Universität München Tyskland.

Utöver basanslaget från VA-Forsk har projektdeltagarna själv bidragit med betydande stöd till projektet bl.a. genom PhD-studier vid Danmarks Tekniske Universitet (DTU) och Avdelningen för Vattenförsörjnings- och Avloppsteknik vid Lunds Tekniska Högskola (LTH). Ett 2-årigt postdoc projekt vid Afdelingen for Miljøteknik Aalborg Universitet och Lehrstuhl für Mikrobiologie, Technische Universität München finansierat av European Environmental Research Organisation (EERO) och Stiftelsen för Internationalisering av Högre Utbildning och Forskning (STINT) har bidragit väsentligt till projektet.

Projektet har varit koordinerat av en styrgrupp bestående av:

Henrik Aspegren, Malmö VA-verk (Projektledare), Jes la Cour Jansen, Avdelningen för Vattenförsörjnings- och Avloppsteknik vid Lunds Tekniska Högskola (LTH), Mogens Henze, Institut for Miljø og Ressourcer vid Danmarks Tekniske Universitet (DTU), Per Halkier Nielsen, Afdelingen for Miljøteknik, Aalborg Universitet och Natuschka Lee, Lehrstuhl für Mikrobiologie, Technische Universität München.

Eftersom projektet har varit så omfattande har samarbeten med en rad andra forskare kunnat byggas upp. Följande personer har direkt eller indirekt medverkat i olika faser av projektet: K.-H. Schleifer och M. Wagner, Lehrstuhl für Mikrobiologie, Technische Universität München, M.C.M van Loosdrecht, Delft University of Technology, K. Dircks Danmarks Tekniske Universitet (DTU) nu Alfa Laval, H. Mosbæk, Danmarks Tekniske Universitet (DTU) och E. Tykesson, Lunds Tekniska Högskola (LTH).

Malmö i oktober 2003

Henrik Aspegren



## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

|                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| Förord .....                                                      | 3  |
| Sammanfattning .....                                              | 7  |
| Summary .....                                                     | 8  |
| Inledning .....                                                   | 9  |
| Biologisk fosforavskiljning .....                                 | 10 |
| Projektets syfte .....                                            | 11 |
| Material och metoder .....                                        | 12 |
| Pilotanläggningen vid Sjölanda reningsverk .....                  | 12 |
| Försöksplan .....                                                 | 13 |
| Driftresultat .....                                               | 14 |
| Populationsdynamik .....                                          | 18 |
| Inlagring och omsättning av organiskt material i biomassan .....  | 23 |
| Datorsimulering av Bio-P processen .....                          | 25 |
| Slutsatser .....                                                  | 29 |
| Bilaga 1. Publikationer som har direkt ursprung i projektet ..... | 30 |



## SAMMANFATTNING

Två avloppsvattenreningsanläggningar i pilotskala med biologisk fosforavskiljning har drivits parallellt i syfte att undersöka påverkan från avloppsvattensammansättningen på reningseffektiviteten och biomassan i system med lång slamålder, inkluderat kväverening, och med kort slamålder, utan kväveavskiljning.

Förutom skillnaderna i kväveavskiljning hade slamåldern betydande effekt på sedimentationsegenskaperna, där anläggningen med kort slamålder generellt hade bättre men mer varierande sedimentationsegenskaper. Slamåldern hade dessutom en betydande effekt på kvarvarande organiskt material i det behandlade vattnet, där den långa slamåldern gav tydligt lägre utgående värden än systemet med kort slamålder.

Avloppsvattnets sammansättning hade större betydelse för den biologiska fosforavskiljningen än vad slamåldern hade. Anläggningen med kort slamålder uppvisade en något bättre fosforavskiljningseffekt när det var kol som begränsade processen. Glukos tycks vara lika bra som acetat som extern kolkälla för biologisk fosforavskiljning.

Stora variationer i den mikrobiella populationen kunde konstateras i båda anläggningarna men effekten av varierande avloppsvattensammansättning var inte likvärdig i de två systemen. Huvudgruppen av bakterier som anses vara ansvariga för den biologiska fosforavskiljningen ingick dock i populationen under hela perioden i båda anläggningarna, om än i väldigt varierande och mycket lägre koncentrationer än vad som normalt har påträffats i laboratorieexperiment med syntetiskt avloppsvatten.

Lagringsprodukterna för biologisk fosforavskiljning var olika när acetat respektive glukos användes för att förbättra processen. När acetat användes lagrades mer poly- $\beta$ -hydroxybutyrat (PHB) aerobt medan mer glykogen lagrades under aeroba förhållanden när glukos utnyttjades.

En datormodell för simulering av processen i anläggningen med lång slamålder var lätt att kalibrera. Endast mindre förändringar i avloppsvattenkaraktiseringen var nödvändiga för att simulera slamproduktionen och kväveavskiljningen. Simuleringen av den biologiska fosforavskiljningen kunde förbättras genom att ta hänsyn till resultat från laboriefosforsläppsförsök utförda under anaeroba förhållanden.

Samma modellkalibrering kunde inte utnyttjas för anläggningen med kort slamålder. Speciellt var det en annorlunda karakterisering av de organiska substanserna som krävdes.

Datormodellen kan användas för simulering av avloppsvattenreningsanläggningar med biologisk fosforavskiljning, men beskrivningen av populationsdynamiken och dynamiken i upplagringsprodukterna återspeglade inte de variationer som förekom i undersökningarna. Detta tros bero på att dagens modeller inte beskriver hela sanningen om biologisk fosforavskiljning men också på att de metoder som nu finns för studier av populationsdynamik och upplagring av organiskt material inte är tillräckligt utvecklade.



## SUMMARY

Two pilot scale wastewater treatment plants have been operated in parallel with biological phosphorus removal in order to investigate the impact of the wastewater composition on the treatment efficiency and biomass in systems with long sludge age including nitrogen removal and short sludge age without nitrogen removal.

Besides the differences in nitrogen removal efficiency the sludge age had a significant impact on the sedimentation properties where the plant with short sludge age in general had better but more varying sedimentation properties and on residual organic matter in the treated water, where the long sludge age gave significantly lower effluent values than the system with the short sludge age.

The wastewater quality was more significant for the biological phosphorus removal than the sludge age. The plant with the short sludge age had a slightly better performance when carbon was limiting the process. Glucose seems to be as good as acetate as an external carbon source for biological phosphorus removal.

Significant variations in the bacterial population were experienced in both plants but the variation in wastewater composition was not reflected equally in the two plants. However the main group of bacteria assumed to be responsible for biological phosphorus removal was found during the whole period in both plants although in very varying concentrations and in much lower concentrations than normally found in laboratory experiments with artificial wastewater.

The storage products in the biological phosphorus removal were different when acetate and glucose were used for improvement of the process. When acetate was used more poly- $\beta$ -hydroxybutyrate (PHB) was stored under aerobic conditions whereas more glycogen was stored under aerobic conditions when glucose was used.

A computer model for simulation of the process in the plant with long sludge age was easy to calibrate. Only minor changes in the wastewater characterisation were necessary in order to model the sludge production and the nitrogen removal. The simulation of the biological phosphorus removal could be improved by taking into account the results from phosphorus release experiments under anaerobic conditions.

The same model calibration could not be used for the plant with short sludge age. In particular a different characterisation of the organic matter was needed.

The computer model can be used for simulation of treatment plants with biological phosphorus removal but the description of the population dynamics and the dynamics in storage products did not reflect the variation found from the examinations. This is believed to be due to the fact that the present models do not describe the full truth about biological phosphorus removal but also that the present state of the methods for studies of the population dynamics and the storage of organic matter are not sufficiently developed.

## INLEDNING

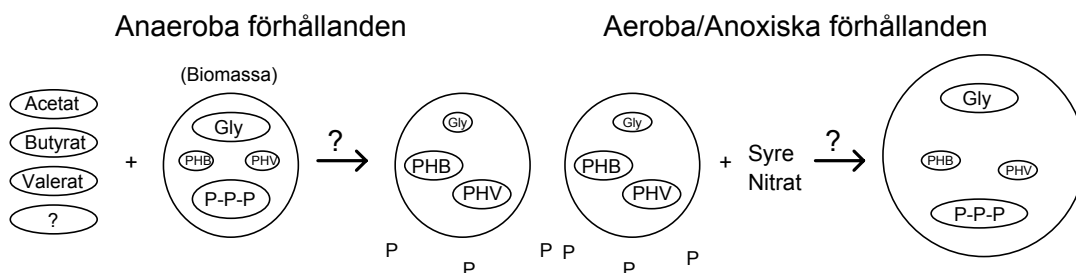
Det senaste decenniets utbyggnad för biologisk kväveavskiljning vid skandinaviska avloppsreningsverk har tydligt visat att vattenkvaliteten och dess variation, speciellt avseende organiskt material, är av avgörande betydelse för reningsresultatet i ett avloppsreningsverk.

I processvarianter där biologisk fosforavskiljning ingår har vattenkvaliteten ännu större betydelse för funktionen. I Sverige där kraven på fosforavskiljning, sett i ett internationellt perspektiv, är mycket långtgående har problem med driftstabilitet troligen varit en av de främsta orsakerna till att biologisk fosforavskiljning inte har fått ett riktigt genombrott. Genom att förbättra hushållningen med organiskt material borde det vara möjligt att generellt förbättra driftstabiliteten för biologiska processer. Härvid krävs dock mer ingående kunskap om omsättningsprocesserna för organiskt material i aktivt slamprocessen.

Syftet med denna studie var primärt att undersöka hur variationer i vattenkvalitet påverkar processresultat och biomassan. I det följande redovisas resultaten från en studie, som varade i 2,5 år. Försöken utfördes på Sjölanda reningsverk i Malmö i en pilotanläggning bestående av två parallella aktivt slam-anläggningar som drevs med biologisk fosforavskiljning, en högbelastad A/O process och en lågbelastad UCT process. Flera olika forskningsprojektsaktiviteter har varit koordinerade kring driften runt dessa anläggningar i syfte att uppnå största möjliga synergi mellan dessa olika aktiviteter. I bilaga 1 finns en samlad översikt över de vetenskapliga publikationer, som har sin fackliga utgångspunkt i försöken.

## BIOLOGISK FOSFORAVSKILJNING

Även om de övergripande mekanismerna för biologisk fosforavskiljning är kända behövs det fortfarande mer kunskap om vilka komponenter i vattnet som gör att processen fungerar. Det kan härvid konstateras att det inte finns några förenklade metoder som kvantitativt kan beskriva fosforavskiljningspotentialen för ett givet vatten. Det finns alltså en betydande osäkerhet avseende hur långtgående fosforavskiljning som kan uppnås i praktiken.



Figur 1. Processen för biologisk fosforavskiljning.

Kunskapen om hur processen för biologisk fosforavskiljning fungerar kan översiktligt sammanfattas enligt figur 1. Enkla fettsyror såsom ättiksyra, smörsyra etc., 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. Troligen är funktionen ungefär densamma under anoxiska förhållanden, åtminstone för en del av bio-P bakterierna.

Den matematiska modellen Activated Sludge Model No 2 (ASM 2d) introducerades 1994 och kan fortfarande sägas utgöra en sammanfattning av den kollektivt förvärvade kunskapen om aktivt slamprocessen. ASM 2d innefattar såväl biologisk kväveavskiljning som biologisk fosforavskiljning och beskriver kopplingen mellan avloppsvattenkvalitet, inlagring i biomassan och utgående vattenkvalitet under givna förutsättningar. I denna modell antas att Bio-P bakterier tar upp enkla fettsyror i inkommande vatten och att även fermentering och hydrolys har direkt betydelse för inlagringen av organiskt material och därmed på avskiljningen av fosfor. Halten fettsyror i inkommande vatten kan relativt lätt mätas medan effekten av hydrolys och fermentering inte kan mätas direkt. Under senare tid har även kunnat visas att andra organismer än bio-P bakterierna har förmåga att lagra upp organiska ämnen. Dessa inlagringsmekanismer har visats ha stor betydelse för omsättningen av det organiska materialet och för hur biomassans respiration sker. Det är inte självklart att effekten av en bio-P process för närvarande förutsägs av modellen med någon högre trovärdighet i en enskild tillämpning.

## PROJEKTETS SYFTE

Syftet med studien var primärt att undersöka hur variationer i vattenkvalitet påverkar processresultat och biomassans sammansättning. Mer specifikt skulle följande funktioner undersökas vid två olika stabiliseringsgrader, kort slamålder (process utan nitrifikation) respektive lång slamålder (process med nitrifikation):

- Kopplingen mellan halt flyktiga syror, upplagringsprodukter och slutligen potentiell avskiljning av fosfor
- Effekten av hydrolys och fermentering
- Driftstabilitet

# MATERIAL OCH METODER

## Pilotanläggningen vid Sjölunda reningsverk

Pilotanläggningen är belägen vid Sjölunda reningsverk i Malmö och består av en försedimenteringsbassäng och två parallella aktivtslam-anläggningar som drivs med biologisk fosforavskiljning, en högbelastad A/O process (Bio-P anläggningen) och en lågbelastad University of Cape Town (UCT) Process (Bio-PN anläggningen), se tabell 1 och figur 2.

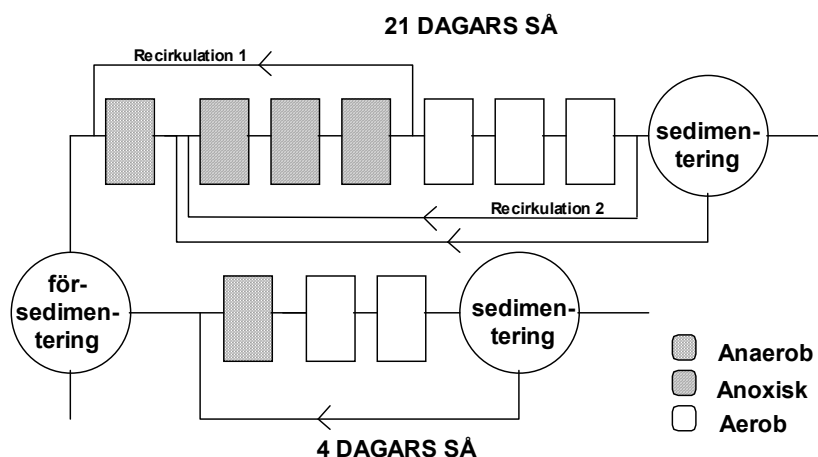
Tabell 1. Tekniska data och driftdata över pilotanläggningen.

| System | Reaktor volym<br>m <sup>3</sup> | Reaktor djup<br>m | Flöde<br>m <sup>3</sup> /h | Upphålls-Tid<br>H | Total SÅ<br>d | Anaerob Uppehållstid*<br>min |
|--------|---------------------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|---------------|------------------------------|
| Bio-PN | 7 x 5                           | 4                 | 1,8                        | 19,4              | 21            | 55                           |
| Bio-P  | 3 x 4                           | 2,1               | 2,5                        | 4,8               | 4             | 48                           |

| System | Anaerob SÅ<br>d | Retur-slam<br>% | Recirkulation 1<br>% | Recirkulation 2<br>% | Sedimenteringsyta<br>m <sup>2</sup> | Sedimenteringsdjup<br>m |
|--------|-----------------|-----------------|----------------------|----------------------|-------------------------------------|-------------------------|
| Bio-PN | 2,0             | 100             | 200                  | 310                  | 4,9                                 | 3,5                     |
| Bio-P  | 1,3             | 100             | --                   | --                   | 4,9                                 | 3,5                     |

\* Uppehållstid inklusive recirkulation.

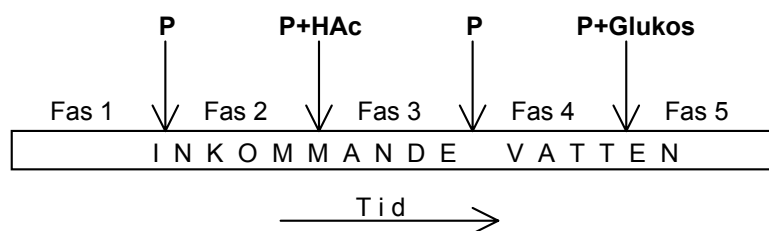


Figur 2. Pilotanläggningen.

Bio-P anläggningen var dimensionerad för biologisk fosforavskiljning och bestod av en anaerob reaktor och två därpå följande aeroba reaktorer (total volym 12 m<sup>3</sup>). Den anaeroba slamåldern var 1,3 dygn och den totala slamåldern 4 dygn. Bio-PN anläggningen var dimensionerad för närsaltavskiljning (N och P) och bestod av en anaerob reaktor, tre anoxa och tre därpå följande aeroba reaktorer (total volym 35 m<sup>3</sup>). Den anaeroba slamåldern var 2 dygn, den anoxiska var 9,5 dygn och den totala slamåldern 21 dygn. Syrehalten i de aeroba reaktorerna reglerades med ett börvärde på 2 mg/l.

## Försöksplan

Försöksstudien varade under 2,5 år och indelades i fem faser se figur 3. Under fas 1 gjordes inga tillsatser till avloppsvattnet utan avsikten med denna period var att observera hur naturliga variationer i avloppsvattnet påverkar processen. Efter denna inledningsfas manipulerades inkommande vatten genom att olika substrat tillsattes. Under fas 2 tillsattes fosforsyra motsvarande 5 mg/l som P under 106 dagar och sedan 10 mg/l som P under 53 efterföljande dagar. Syftet var att säkra ett överskott av fosfor så att det var tillgången av kol till bio-P processen som var begränsande. Under fas 3 tillsattes fosforsyra motsvarande 10 mg/l som P och ättiksyra motsvarande 200 mg/l som COD under 76 dagar och sedan fosforsyra motsvarande 10 mg/l som P och ättiksyra motsvarande 100 mg/l som COD under 124 efterföljande dagar. Syftet var att bedöma hur mycket lättillgängligt kol som krävs för att ta bort en given mängd fosfor. Under fas 4 tillsattes fosforsyra motsvarande 10 mg/l som P i 76 dagar som en övergång till projektets sista fas, där glukos tillsattes. Fas 4 syftade också till att undersöka om den mikrobiella populationen återställdes till det tillstånd den hade innan acetat tillsattes under fas 2. Under fas 5 tillsattes fosforsyra motsvarande 10 mg/l som P och glukos motsvarande 100 mg/l som COD under 145 dagar för att utvärdera hur glukos fungerar i Bio-P sammanhang. Härvid antogs att bio-P processen kräver närvaro av enkla fettsyror och att glukos skulle ge viss inblick i hur processerna för hydrolys och fermentering fungerar.



Figur 3. Pilotstudiens fem faser.

Flödet till pilotanläggningen hölls medvetet konstant för att säkerställa att experimentresultaten skulle reflektera effekten av vattenkvalitet och driftsätt och inte påverkas av en varierande flödesbelastning. Inkommande avloppsvatten till pilotanläggningen kan karakteriseras som utspätt med medelkoncentrationer enligt det följande: BOD<sub>7</sub> 200 mg/l, filtrerad (GF/A) COD 130 mg/l, Total-N 27 mg/l och total-P 4 mg/l. Ungefär 49 % av den filtrerade COD består av flyktiga syror (VFA), med ättiksyra som primär komponent (77 %).

Tabell 2. Doseringsstrategin i pilotstudiens fem faser.

| Fas                 | P-dosering               | Kol dosering               |
|---------------------|--------------------------|----------------------------|
| 1                   | Ingen dosering           | Ingen dosering             |
| 2 Första 106 dagar  | 5 mg/l P som fosforsyra  | Ingen dosering             |
| Följande 53 dagar*  | 10 mg/l P som fosforsyra |                            |
| 3 Första 76 dagar   | 10 mg/l P som fosforsyra | 200 mg/l COD som ättiksyra |
| Följande 124 dagar* | 10 mg/l P som fosforsyra | 100 mg/l COD som ättiksyra |
| 4                   | 10 mg/l P som fosforsyra | Ingen dosering             |
| 5                   | 10 mg/l P som fosforsyra | 100 mg/l COD som glukos    |

\* Den ändrade doseringen i fas 2 och 3 är markerad med pil på de efterföljande figurerna.

## DRIFTRESULTAT

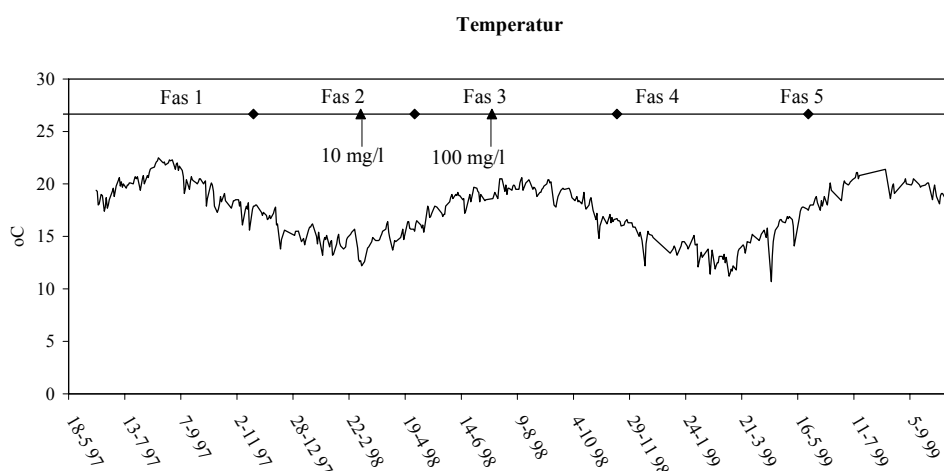
Under hela försöket längd tillämpades ett mycket omfattande standardanalysprogram. Provtagning och analys utfördes av VA-verket Malmö.

Dygnsprov togs ut fem dagar i veckan (söndag – torsdag) på föresedimenterat vatten och utgående vatten från de två processerna. Dygnsproven analyserades med avseende på standardparametrar såsom COD ofiltrerat/filtrerat (GF/A), suspenderad substans (SS), Total-P ofiltrerat/filtrerat (GF/A), Total-N,  $\text{NH}_4\text{-N}$ , och  $\text{NO}_3\text{-N}$ . Vidare analyserades dygnsproven ungefär 2 gånger i veckan med avseende på Fe, Ca, Mg, Al och K.

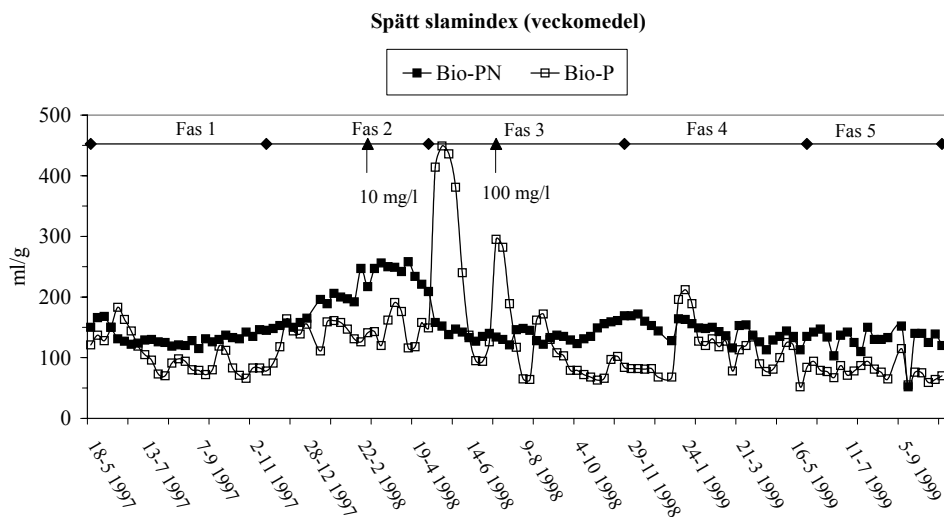
Stickprov togs ut fem dagar i veckan på morgonen (måndag - fredag) på inkommande vatten, på filtrat från de två anaeroba reaktorerna och på slam från de sista aeroba reaktorerna i respektive process. Stickproven på inkommande vatten analyserades med avseende på VFA, uppdelat på fraktionerna ättiksyra, propionsyra, smörsyra och valeransyra, och COD filtrerat. Stickproven från de anaeroba reaktorerna analyserades med avseende på fosfor och slammet analyserades med avseende på MLSS, MLVSS och Total-P ofiltrerat/filtrerat (GF/A). Vidare mättes slammets sjunkegenskaper som spätt slamindex (DSVI). Härvid användes en 60 mm cylinder och avläsning av slamvolymen gjordes efter 30 minuter. Prover späddes i regel en faktor 2 med renat avloppsvatten

Samtliga analysdata finns sammanställda och tillgängliga i tabellform och i Microsoft Excel format. I det nedanstående kommer endast vissa valda parametrar att redovisas. Det finns dock möjlighet att erhålla datasammanställningen genom att ta kontakt med Avdelningen för Vattenförsörjnings- och Avloppsteknik i Lund. Resultaten har dessutom presenterats i /Henze et al., 2002/.

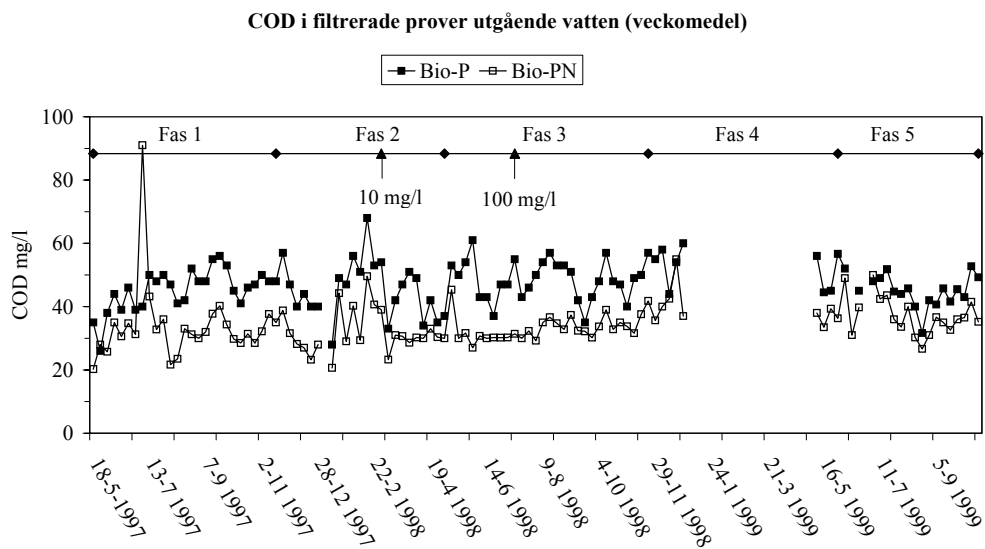
Pilotanläggningen drevs utan temperaturkontroll och variationerna i anläggningen var således ett resultat av klimatet och det avloppsvatten som belastar systemet. I figur 4 visas temperaturvariationen under försöksperioden. Slammets sjunkegenskaper mätt som DSVI kan ses i figur 5. Processernas utgående halter med avseende på COD, kväve och fosfor framgår av figur 6, 7 och 8.



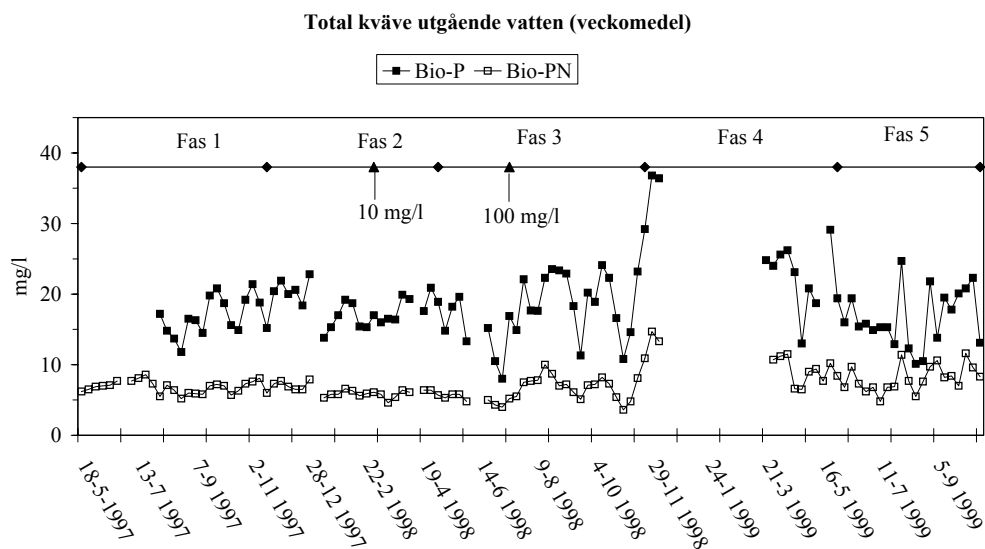
Figur 4. Temperaturvariation i Bio-PN anläggningen.



Figur 5. Variationer i DSVI (Spätt slamvolymindex) i de två anläggningarna.

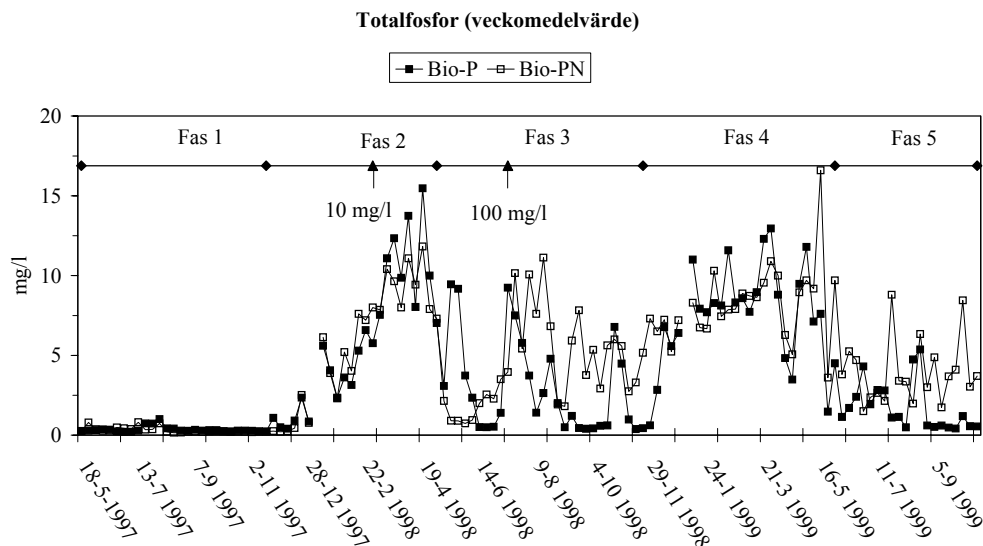


Figur 6. COD i filtrerade prover i utgående vatten från de två anläggningarna.



Figur 7. Totalkväve i utgående vatten från de två anläggningarna.





Figur 8. Totalfosfor i utgående vatten från de två anläggningarna.

Temperaturen varierade enligt figur 4 mellan ca 10–22°C i båda anläggningarna, med en tendens till att temperaturen är lite lägre och lite mer varierade i Bio-P anläggningen som har den kortaste hydrauliska uppehållstiden. Den naturliga temperaturvariationen komplicerar analysen av resultaten men ger på andra sida en inblick i hur temperaturen påverkar processen. Det finns ingen skillnad mellan anläggningarna som kan tillskrivas effekten av en varierande temperatur. Resultaten avseende fosforavskiljning, figur 8, uppvisar inga tecken på temperaturpåverkan. Detta betyder inte att temperaturen inte har någon effekt på de biologiska processerna utan innebär endast att vid den givna belastningen syns inte temperatur-effekten. Temperaturvariation mellan in och utgående vatten var mindre än 2°C och orsakades av kylning respektive upphettning av vattnet i reaktortankarna.

Figur 5 visar att slammets sjunkegenskaper mätt som DSVI varierade avsevärt i bägge anläggningarna under experimentet. Det kan också ses att DSVI i Bio-PN anläggningen är betydligt mer stabilt än i Bio-P anläggningen. Då bägge anläggningarna har drivits med samma inkommande avloppsvatten, men vid olika belastning, kan fastslås att slamåldern har stor betydelse för slammets sjunkegenskaper. I Bio-P anläggningen gav ett högt DSVI vid flera tillfällen upphov till avsevärda driftproblem i sedimenteringsbassängen. Bio-P anläggningens slam och biomassa förändras mycket snabbt och detta kan medföra att en rad slam-egenskaper förändras snabbt. Förhöjda DSVI värden i Bio-P anläggningen noterades speciellt i anslutning till fas 3 då acetat började doseras och då acetatdosen förändrades. Motsvarande effekt kunde inte ses under fas 5 då glukos doserades. I Bio-PN anläggningen förelåg inga problem av denna art även om DSVI generellt över hela perioden var högre än i Bio-P anläggning.

Den lösta COD halten i utgående vatten är lägre i Bio-PN anläggningen i jämförelse med Bio-P anläggningen. Detta resultat var förväntat med tanke på skillnaden i slamålder. Resultatet avseende total COD i utgående vatten var det omvända. I detta fall är halterna från Bio-PN anläggningen de högsta. Detta orsakas troligtvis av de generellt sett sämre sjunkegenskaperna mätt som DSVI eller denitrifikation i sedimenteringsbassängen. Bio-P anläggningen hade i de

flesta perioder ingen eller väldigt låga halter nitrat i inkommande vatten till sedimenteringsbassängen och således fanns inga förutsättningar för denitrifikation i detta fall. Det kan också ses i figuren att varken doseringen av acetat eller glukos ger upphov till förhöjda utgående halter löst COD. Slutligen kan konstateras att det finns en viss samvariation mellan anläggningarna avseende utgående halt löst COD.

Resultaten avseende kväveavskiljning var förväntade och de lägsta utgående halterna erhöles i Bio-PN anläggningen (figur 7).

De 5 driftsfaserna framgår tydligt av figur 8 där utgående halt total-fosfor visas. I fas 1, då anläggningarna drivs med enbart inkommande avloppsvatten, uppnås i stort sett fullständig fosforavskiljning med en medelhalt för hela perioden som är mindre än 0,3 mg/l i bägge anläggningarna. I fas 2 doseras fosfor, först 5 mg/l och sedan 10 mg/l och det kan ses att utgående halter fosfor ökar. Fosforavskiljningen ökar märkbart under period 3 då kolkälla doserades. I figuren kan ses att halterna inledningsvis är mycket låga för att sedan då dosen minskas öka och variera avsevärt vilket antyder att processen är kolbegränsad. Detta var också avsikten med doseringen. Då kolkälledosering upphör ökar utgående fosforhalter igen. Under period 5 då glukos doseras sjunker halterna återigen. Eventuellt är utgående halt fosfor något mer stabil då glukos doseras i jämförelse med perioden då acetat doseras. Vidare förefaller det som om fosforavskiljningen är något högre i Bio-P anläggningen i jämförelse med Bio-PN anläggningen under de perioder som kolkälla doseras. Det är dock inte självklart att detta enbart är en effekt av processen i sig utan kan även vara ett resultat av sedimenteringsprocessen. Det har tidigare nämnts att halten Total COD i utgående vatten var högre från Bio-PN anläggningen i jämförelse med Bio-P anläggningen som ett resultat av högre halter suspenderade ämnen i utgående vatten från denna anläggning. De högre halterna totalfosfor kan alltså även vara resultatet av olikheter i sedimenteringsprocessen.

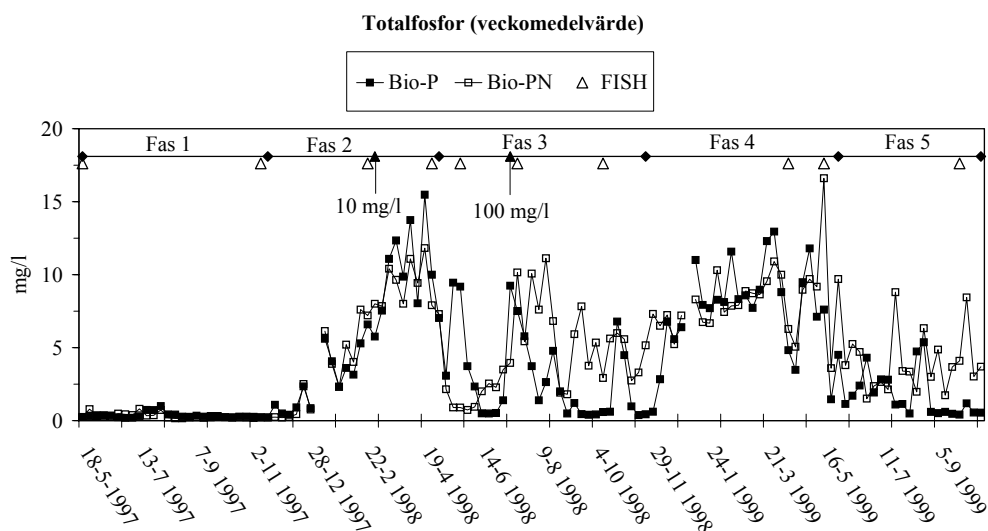
## POPULATIONSDYNAMIK

Framgångsrik biologisk fosforavskiljning antas vara knutet till närvaron av bestämda typer av bakterier (polyfosfatackumulerande organismer, PAO). Det är emellertid ännu inte fastlagt vilka bakterier det handlar om. Det finns heller ingen enighet om det handlar om en speciell bakterie eller några få grupper av bakterier eller om det i praktiken handlar om ett bredare spektrum av bakterier. Ett antal bakterier som "kandiderar" om att vara de centrala bio-P bakterierna har dock identifierats. Driften av de två pilotanläggningarna med olika slamålder och med mycket väldefinierade betingelser för biologisk fosforavskiljning möjliggör att variationen i den bakteriella populationen (populationsdynamiken) kan utvärderas. Genom att studera populationsdynamiken är det möjligt att undersöka om ändringarna i bio-P funktionen är ett resultat av specifika bakteriers tillväxt. Det är i så fall också möjligt att identifiera dessa organismer. Denna del av projektet har varit mycket omfattande och har genomförts av projektgruppen i ett tätt samarbete med internationellt erkända experter inom området, speciellt forskargrupperna på Lehrstuhl für Mikrobiologie, Technische Universität München i Tyskland och på Afdelingen for Miljøteknik Aalborg Universitet.

Arbetet har rapporterats i tre internationellt publicerade artiklar /Lee et al., 1999/, /Lee et al., 2001/ och /Lee et al., 2003/, vilka det hänvisas till för detaljer om studien.

Under denna studie har fokus legat på nyare metoder baserade på molekylärbiologi, FISH (Fluorescence In Situ Hybridisation) och MAR (MicroAutoRadiography) (för detaljer se Lee et al., 2003). Vid FISH används genprober för att identifiera grupper av bakterier eller bestämda avgränsade stammar. Genprober med fluorescens tillverkas för att matcha den grupp eller stam man vill identifiera och de prober som passar fästs till arvsmassan (rRNA) i bakterien. De markerade och därmed identifierade bakterierna kan därefter ses i mikroskop. Med MAR är det möjligt att följa substratomsättningen med hjälp av radioaktivt markerade substrat. FISH har använts för att utvärdera populationsdynamiken genom hela försöksperioden i de två pilotanläggningarna. Kombinationen av FISH och MAR har utnyttjats i ett försök att identifiera bakterier som är väsentliga för biologisk fosforavskiljning och samtidigt kunna dokumentera bakteriernas omsättning av de organiska ämnena som ingår i processen.

Tekniskt är dessa mikrobiologiska analyser komplicerade och i studien har det ingått mycket stora utvecklingsaktiviteter av metodik som har legat utanför projektet. Det har därför endast varit möjligt att undersöka 10 prover. I figur 9 visas dessa provtagningstidpunkter tillsammans med tidsserien för utgående halt totalfosfor. Det framgår att provtagningen täcker hela försöksperioden för studien och således kan förväntas spegla förändringar i biomassan vid alla de tidpunkter då processerna har varit utsatta för förändrade belastningsförhållanden med hänsyn till potentiell bio-P aktivitet.



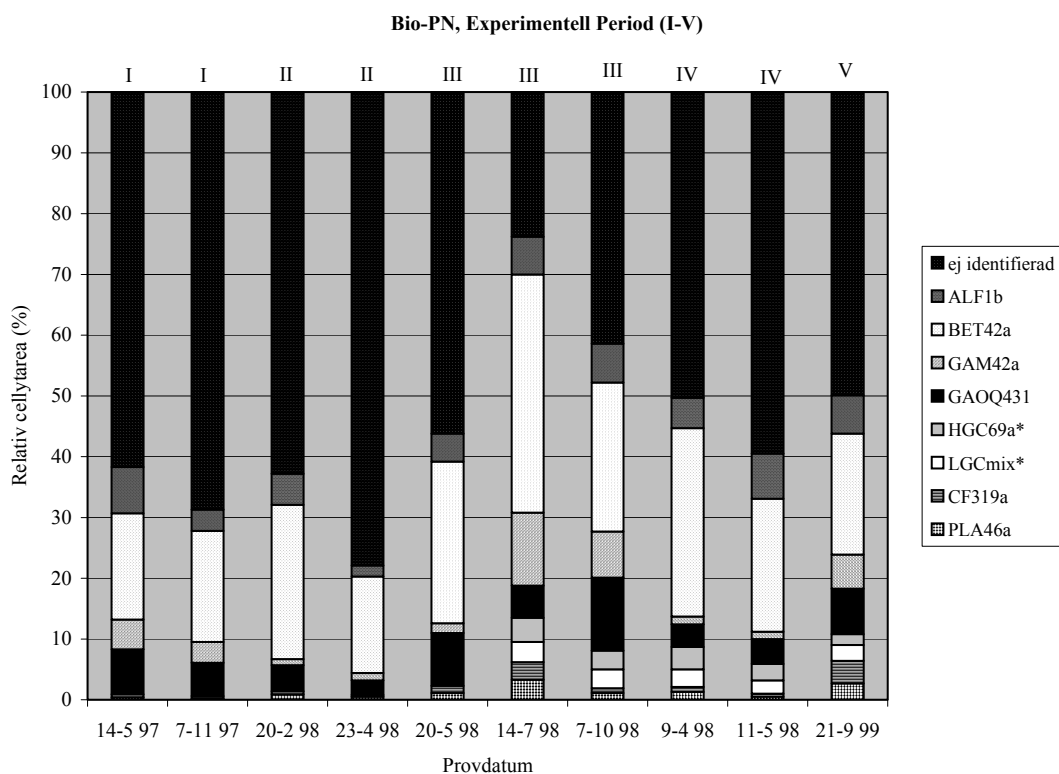
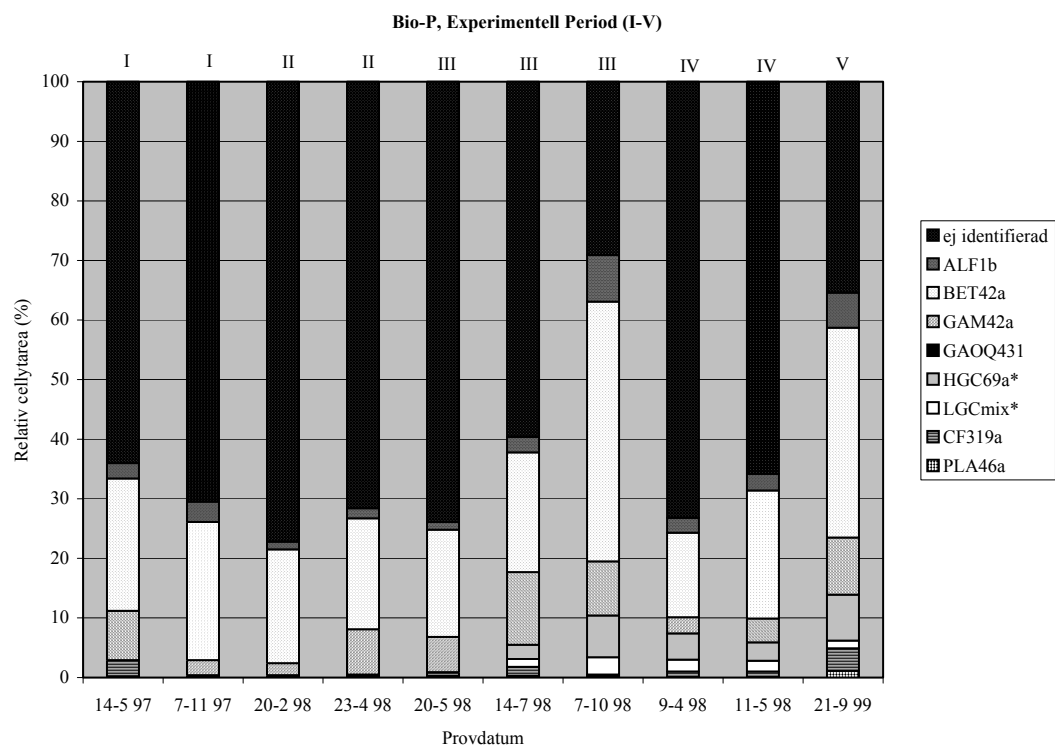
Figur 9. Utgående halt totalfosfor fosfor från de två pilotanläggningarna tillsammans med försökets 5 faser och tidpunkter för uttag av prov till studien av populationsdynamiken.

Kartläggningen av variationerna i populationsdynamiken är genomförd med gen-prober som identifierar mikroorganismernas huvudgrupper och mera specifika grupper vilka förväntas ha central betydelse för biologisk fosforavskiljning. I studien ingår i stort sett alla de prober som anses relevanta och som var tillgängliga vid tidpunkten för studien. De rRNA-specifika proverna som användes för FISH i undersökningen framgår av tabell 3. I tabellen ses den förväntade funktionen av de bakterier som identifieras med de olika proverna och det kan ses att biomassan undersöktes med avseende på fyra av de tio huvudgrupper som bakterier vanligtvis delas in i baserat på rRNA analys.

Figur 10 visar sammansättningen av bakteriepopulationen vid vart och ett av de 10 provtagningstillfällena. I figuren finns resultat med för de bakteriegrupper som har förekommit i större andel i ett eller flera prover. Först och främst kan man se att trots det stora antalet prober har inte alla bakterier lyckats identifieras och under försöksförloppet varierar andelen identifierade bakterier. Det kan ses betydande variationer mellan de två pilotanläggningarna och även mycket kraftiga tidsmässiga variationer.

Tabell 3. Genprober som utnyttjades för studier av populationsdynamiken. De prober som användes för kvantifiering är angivna i fetstil.

| Mål                                                                   | Probe             | Specificitet                                                                                                                |
|-----------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Domän</b>                                                          |                   |                                                                                                                             |
| <i>Archaea</i>                                                        | ARCH915           | <i>Archaea</i>                                                                                                              |
| <i>Eucarya</i>                                                        | EUK516            | <i>Eucarya</i>                                                                                                              |
| <i>Bacteria</i>                                                       | <b>eub338</b>     | <i>Bacteria</i>                                                                                                             |
|                                                                       | <b>EUB II</b>     | Komplement för <i>Planctomycetales</i>                                                                                      |
|                                                                       | <b>EUB III</b>    | Komplement för <i>Verrucomicrobia</i>                                                                                       |
| <b>Grupper inom bacteria</b>                                          |                   |                                                                                                                             |
| Alphaproteobakterier                                                  | <b>ALF1b</b>      | Alphaproteobakterier, några Deltaproteobakterier och Spirocheter                                                            |
|                                                                       | PAR1457           | <i>Paracoccus</i> spp.                                                                                                      |
| Betaproteobakterier                                                   | <b>BET42a</b>     | Betaproteobakterier                                                                                                         |
|                                                                       | <b>BONE23a</b>    | Betaproteobakterier, undergrupp I                                                                                           |
|                                                                       | <b>BTWO23a</b>    | Konkurrent till BONE23                                                                                                      |
|                                                                       | <b>PAO651</b>     | <i>Rhodocyclus</i> klon                                                                                                     |
|                                                                       | <b>RHC439</b>     | <i>Rhodocyclus</i> kluster                                                                                                  |
|                                                                       | <b>RHX991</b>     | <i>Accumulibacter phosphatis</i>                                                                                            |
|                                                                       | <b>OTU1-1415</b>  | <i>Zoogloea ramigera</i> ATCC 19544 <sup>T</sup><br><i>Zoogloea</i> -relaterade klonsekvenser, <i>Thiobacillus cuprinus</i> |
| Gammaproteobakterier                                                  | ZRA               | <i>Zoogloea ramigera</i> , ATCC 19544 <sup>T</sup>                                                                          |
|                                                                       | <b>GAM42a</b>     | Gammaproteobakterier                                                                                                        |
|                                                                       | ACA23a            | <i>Acinetobacter</i> sp.                                                                                                    |
|                                                                       | <b>GAOQ431</b>    | Ny Gammaproteobakterie                                                                                                      |
|                                                                       | Gam 1019          | Ny Gammaproteobakterie                                                                                                      |
| Grampositiva bakterier med högt GC-innehåll ( <i>Actinobacteria</i> ) | Gam 1278          | Ny Gammaproteobakterie                                                                                                      |
|                                                                       | <b>HGC69a</b>     | <i>Actinobakterier</i>                                                                                                      |
|                                                                       | Actino_1011       | Ny <i>Actinobakterie</i> klonsekvenser                                                                                      |
|                                                                       | MIC179<br>MIC 429 | <i>Microthricus phosphovorans</i>                                                                                           |
| Grampositiva bakterier med lågt GC-innehåll                           | <b>LGC354a</b>    | <i>Bacillus</i> -undergren a                                                                                                |
|                                                                       | <b>LGC354b</b>    | <i>Bacillus</i> -undergren b                                                                                                |
|                                                                       | <b>LGC354c</b>    | <i>Bacillus</i> -undergren c                                                                                                |
| <i>Bacteroider, Cytophager</i>                                        | <b>CF319a</b>     | <i>Cytophaga-Flavobacterium</i>                                                                                             |
| <i>Planctomycetaler</i>                                               | <b>PLA46a</b>     | <i>Planctomycetales</i> , <i>Chlamydiaceae</i>                                                                              |



Figur 10. Mikrobiell sammansättning i de två pilotanläggningarna under försöksperioden.  
 \*Anger att ingen kvantifiering är gjord i de första 5 proven.

Studien av populationsdynamiken visade att:

Den huvudgrupp av bakterier som i dag förväntas vara den dominerande för biologisk fosforavskiljning (*Rhodocyklus*-liknande bakterier) kunde identifieras under hela försöksperioden i båda anläggningar, men i mycket varierande koncentrationer (från 4–28 % av den totala populationen). Det fanns bara ett svagt samband mellan mängden av dessa bakterier och anläggningens bio-P funktion mätt som det maximala fosforinnehållet i slammet. Sambandet var något svagare än det man normalt kan finna vid laboratorieundersökningar där man arbetar med konstgjort avloppsvatten.

Det fanns också betydande variationer i sammansättningen av bakterier som inte förväntas ingå i bio-P processen, men det är inte överraskande i ljuset av de stora belastningsmässiga och temperaturmässiga variationerna som fanns i de två anläggningarna.

Kombinationen av FISH och MAR visade att huvudparten av de *Rhodocyclus*-liknande bakterierna var i stånd till att utföra de centrala bio-P funktionerna – att ta upp acetat under anaeroba förhållanden och därefter ta upp fosfor under aeroba förhållanden. Detta pekar på att denna bakteriegrupp är en viktig bio-P grupp.

I den högbelastade anläggningen fanns det flera andra bakteriegrupper, vilkas närvaro korrelerade bättre med bio-P funktionen än *Rhodocyklus* gruppen och FISH-MAR visade också att dessa bakterier kunde uppta stora mängder fosfor. Det är därför troligt att det även är andra bakteriegrupper än *Rhodocyklus*-liknande bakterier är involverade i biologisk fosforavskiljning.

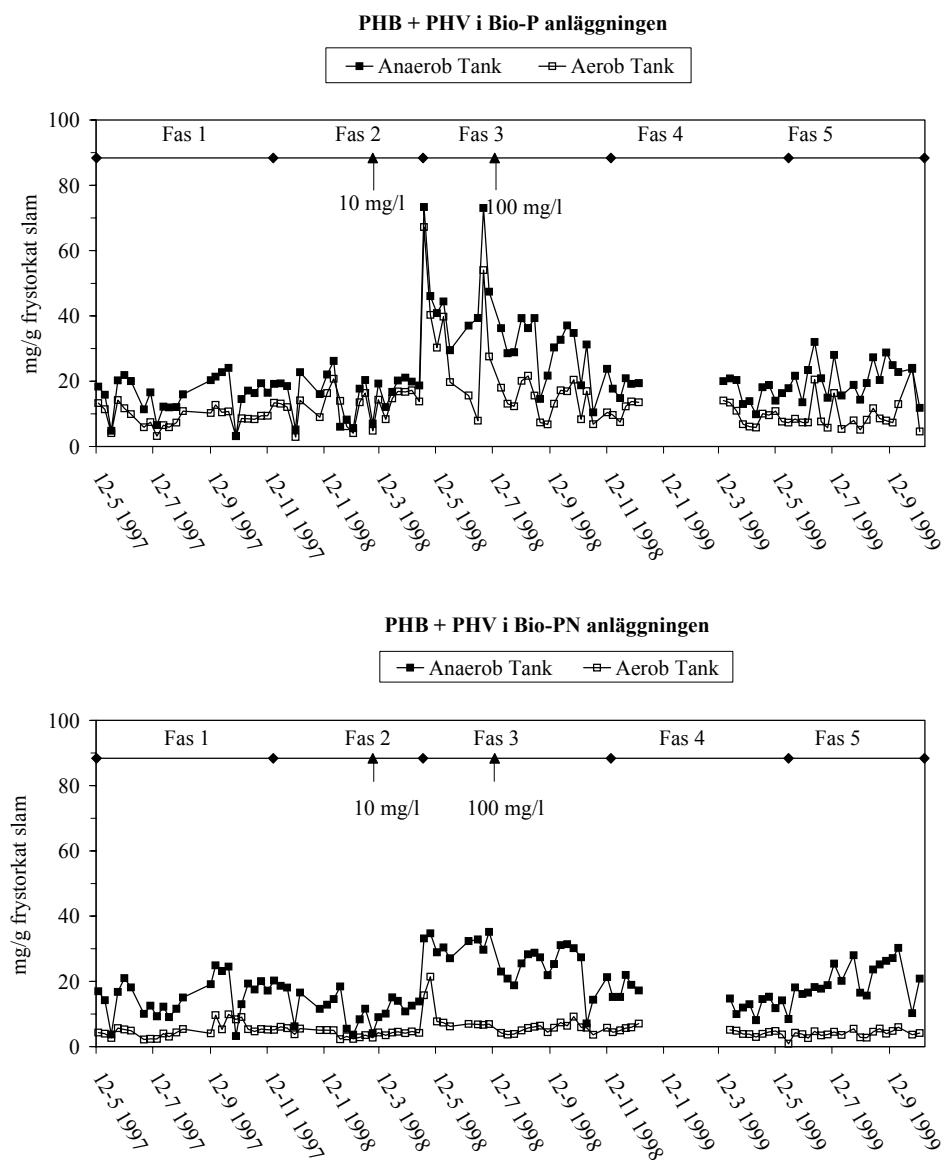
## INLAGRING OCH OMSÄTTNING AV ORGANISKT MATERIAL I BIOMASSAN

Slammet från pilotanläggningarna utnyttjades även i ett doktorandarbete vid Institut for Miljø og Ressourcer, Danmarks Tekniske Universitet (DTU), där upplagringsprocesser i aktivt slamprocessen studerades mer i detalj. Arbetet utfördes av Klaus Dircks med Mogen Henze och Hans Mosbæk som handledare och är beskriven i /Dircks, 2000/ och i /Dircks et al., 2001/. Arbetet utfördes huvudsakligen i laboratoriemiljö och experimenten utfördes i regel under kortare tidsperioder. Experimenten innefattade bl.a. aeroba bägerförsök där slam från anläggningarna utnyttjades. Ett typiskt försök innebar att acetat eller glukos tillsattes till slammet som kontinuerligt luftades och därefter mättes OUR, halten PHB och glykogen i slammet och halten kolkälla i vattenfasen som funktion av tiden. I Dircks avhandling konkluderas bl.a. att beroende på vilken kolkälla som doseras fås olika inlagringsprodukter. PHB-uppbyggnad är den dominerande processen för de studerade slammen vid heterotrof omvandling av acetat och glykogen uppbyggnad är den dominerande processen för de studerade slammen vid heterotrof omvandling av glukos under aeroba förhållanden. Ungefär 10–15 % av den tillsatta glukosen omvandlas till PHB. Vidare konstateras att det finns skillnader mellan slammet från den högbelastade respektive lågbelastade anläggningen avseende hastigheten med vilken PHB bryts ned.

För att studera hur den doserade ättiksyran respektive glukosen inlagrades i biomassan i ett långtidsexperiment analyserades slammets innehåll av Poly- $\beta$ -hydroxybuturat och poly- $\beta$ -hydroxyvalerat (PHB och PHV) regelbundet. Stickprov från såväl den anaeroba reaktorn som den aeroba reaktorn analyserades i regel en gång i veckan. Halterna PHB och PHV i slammet i den anaeroba reaktorn och i den sista aeroba reaktorn under hela undersökningsperioden framgår av figur 11.

Av det tidigare avsnittet framgick att inga nämnvärda skillnader fanns mellan de två perioderna avseende fosforavskiljning då acetat och glukos doserades. Eventuellt var fosforavskiljningen något bättre i Bio-P anläggningen. I figur kan noteras att halterna PHB och PHV i synnerhet i den sista aeroba tanken är högre i Bio-P anläggningen i jämförelse med Bio-PN anläggningen. I figurerna kan också ses att halterna PHB i slammet ökar då en kolkälla doseras. En jämförelse av effekten på PHB och PHV inlagringen av de bägge kolkällorna vid samma dos antyder att ökningen, är något större då acetat doseras än då glukos doseras. Denna effekt är tydligast i Bio-P anläggningen.





Figur 11. Upplagrad PHB och PHV i biomassan.

Sammanfattningsvis antyder denna långtidsstudie och dessa resultat att det finns processmässiga skillnader mellan anläggningarna och att inlagringsprodukterna för acetat och glukos kan vara olika i likhet med vad som har framkommit i Klaus Dircks avhandling. Det kan också konstateras att mekanismerna för biologisk fosforavskiljning och inlagring av organiska ämnen är mer komplicerade än vad som antogs då försöket planerades. Doseringen av glukos t.ex. bidrog inte i någon högre grad till att belysa hur mekanismerna för hydrolys och fermentering fungerar.

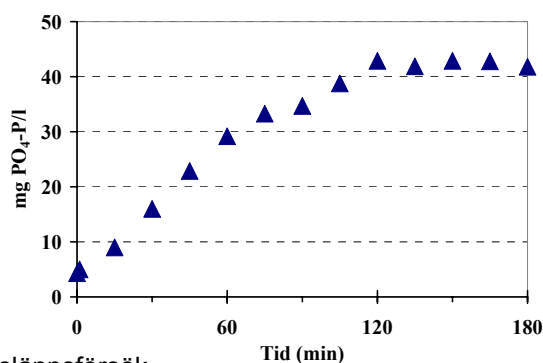
## DATORSIMULERING AV BIO-P PROCESSEN

De många komplicerade processerna som ingår i ett modernt reningsverk med biologisk fosforavskiljning och eventuellt också med kväverening gör det önskvärt att kunna simulera processerna. Detta både för att öka kunskaperna om anläggningens drift vid olika förutsättningar och för att kunna optimera den dagliga driften. Också forskningsmässigt är modellering och datorsimuleringar av stort intresse eftersom det fortfarande är många processmässiga detaljer som inte är kartlagda. Datormodeller kan även vara ett verktyg då den praktiska betydelsen av idéer och forskningsresultat skall utvärderas. Vidare kan modeller vara ett viktigt hjälpmedel till planering och prövning av experiment.

Arbetet med datormodeller i denna studie har främst varit fokuserat på att undersöka om P-släppsförsök ger en så rättvisande bild av slammets bio-P funktion att sådana mätningar kan förbättra kalibreringen av datormodeller för biologisk fosforavskiljning. I ett P-släppsförsök som utförs i laboriemiljö undersöks slammets frigivande av fosfor under anaeroba förhållanden med acetat i överskott. Resultaten är rapporterade i en internationell artikel /Tykesson et al., 2002/ och ingår också i en licentiatuppsats /Tykesson, 2002/. Vid simuleringarna har den kommersiella datormodellen EFOR, använts som i sin tur baseras på ASM 2d.

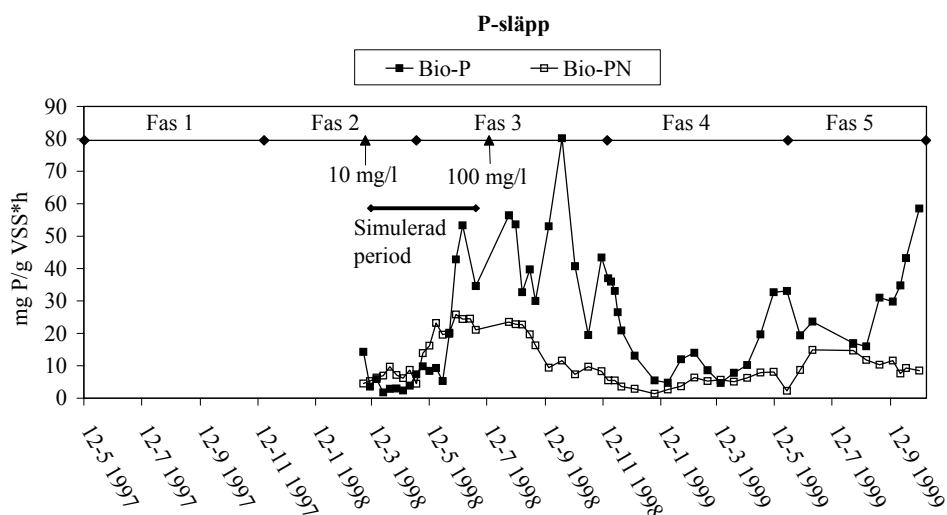
Som grund för datorsimuleringarna har, förutom de normala driftsanalyserna från pilotanläggningarna, också P-släppsförsök använts. Dessa utfördes varannan vecka under nästan hela försöksperioden. Figur 12 visar principen för de använda P-släpps-försöken. För en djupare beskrivning av utförande och användning av släppförsök hänvisas till /Tykesson, 2002/.

Ett P-släppsförsök som beskrivs nedan kan utföras utan större problem på ett reningsverk och kan användas för att karakterisera biomassan och uppskatta bio-P aktiviteten. Ökningen av den lösta fosfathalten mäts när slammets utsätts för anaeroba förhållanden och tillgång på acetat i överskott. För kalibrering av datormodellen används den initiella P-släppshastigheten, beräknad under försökets första halvtimme, för att beskriva storleken på populationen av bio-P bakterier.



Figur 12. Princip för P-släppsförsök.

Figur 13 visar resultaten av P-släppsförsöken från hela perioden i var och en av de två pilotanläggningarna. På figuren är det dessutom angett den tidsperiod som har använts för simuleringarna.



Figur 13. Initiell P-släppshastighet från pilotanläggningarna på Sjölunda. Den period som har använts för datorsimuleringarna är markerad.

Mätningarna av P-släpp började något senare än de övriga mätningarna. I figuren ses tydligt att båda anläggningarna reagerar kraftigt då acetat börjar doseras i fas 3. Då dosen sänks sjunker hastigheterna i båda anläggningarna, men mest tydligt i Bio-PN anläggningen där en hastighet motsvarande den som fanns innan acetatdoseringen uppnås. Då acetatdoseringen avslutats sjunker hastigheten ytterligare, speciellt i Bio-P anläggningen. Då glukosdoseringen inleds ökar hastigheten i Bio-PN anläggningen medan motsvarande fenomen inte ses lika tydligt i Bio-P anläggningen. I huvuddelen av försöksperioden är släppet störst i Bio-P linjen. Endast i perioden med hög acetat-dosering i början av fas 2 är släppet här lågt. Det kan förklaras med att slamåldern sjönk kraftigt på grund av slamflykt ner till en nivå som var kritisk för bio-P processen.

Arbetet med att kalibrering av ASM 2d modellen fokuserades på den lågbelastade Bio-PN anläggningen med både biologisk kväve och fosforavskiljning. Det undersöktes dessutom om den kalibrerade modellen därefter kunde användas för att beskriva fosforavskiljningen i den högbelastade Bio-P anläggningen där slamåldern är så kort att kväveavskiljning inte är möjlig.

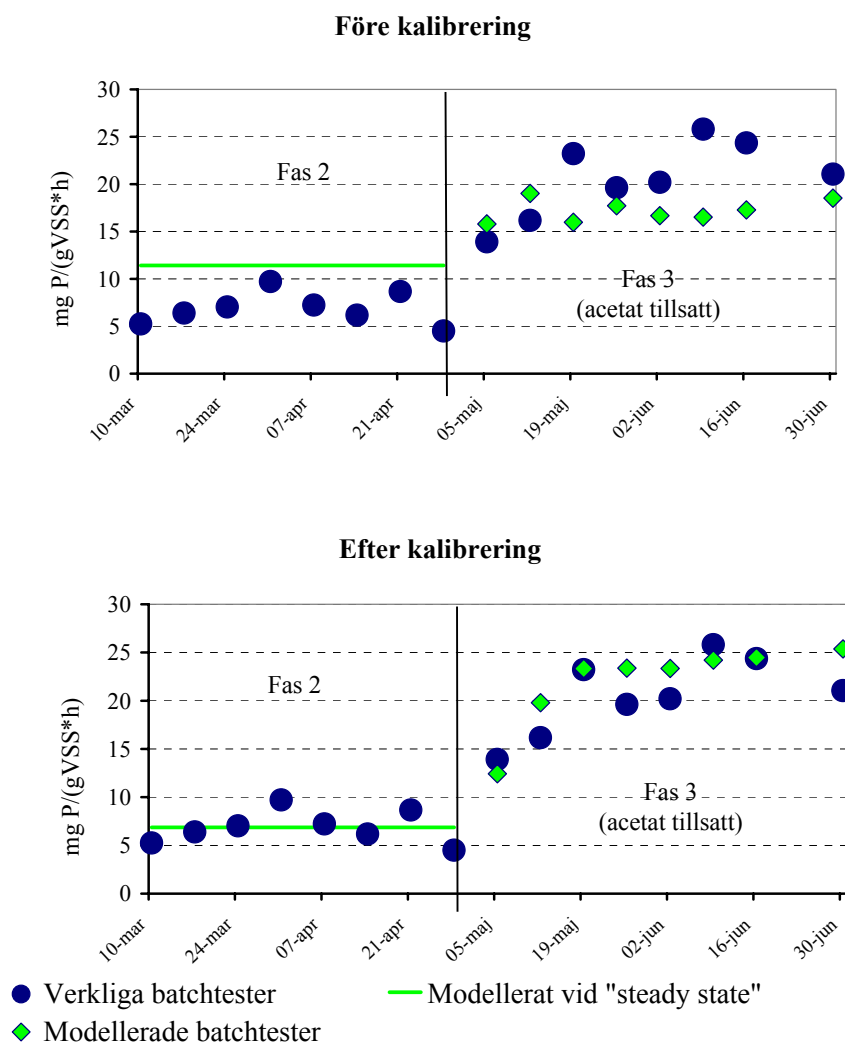
Kalibreringsstrategin för datorsimuleringen var att kalibrera datormodellen med resultat från en relativ stabil driftsperiod för att därefter verifiera kalibreringen med resultat från en period med mer dynamiska variationer. Av figur 13 ses att den stabila perioden är vald till slutet av fas 2, då 10 mg/l P tillsattes till avloppsvattnet. Till följd av denna tillsats erhålls ett överskott av P som inte kan avlägsnas vid de givna driftförhållandena. I den efterföljande fas 3 tillsattes stora mängder acetat (200 mg/l), vilket förväntas ha en dramatisk effekt på den biologiska fosforavskiljningen.

Medelbelastningen av anläggningen är utnyttjad för att simulera de stationära förhållandena i fas 2. Kalibreringen är därefter gjord i två steg. Först blev karakteriseringen av avloppsvattensammansättningen justerad så att avloppskvaliteten av COD och slamproduktionen i anläggningen svarade till de faktiska förhållandena.

Därefter användes den estimerade slamsammansättningen för att simulera förloppet av de mätta P-släppen, så att den del av modellen som har inflytande på P-släppet kunde kalibreras. Den samlade beskrivningen av kalibreringen och datorsimuleringen finns i /Tykesson et al., 2002/ och i /Tykesson, 2002/.

Den helt okalibrerade datormodellen, där endast anläggningens drift och belastning utnyttjades tillsammans med modellens standardvärden, var inte i stånd att kunna beskriva de uppmätta resultaten. De två kalibreringsstegen medförde stora förbättringar i modellens sätt att beskriva reningsresultaten. Figur 14 visar de modellerade P-släppsförsöken utan kalibrering och efter kalibrering. Modellen är kalibrerad med medelbelastningen och därmed till medel-P-släppet i fas 2. I Fas 3 kan de uppmätta värdena direkt jämföras med de simulerade värdena.

Det kan ses att den okalibrerade modellens resultat ligger långt från de uppmätta värdena medan det efter kalibrering uppnås en god beskrivning av de dynamiska variationerna som uppträder vid start av acetatdosering i fas 3.



Figur 14. Datorsimulering av P-släppsförsök före och efter kalibrering av modellen. Modellen är kalibrerad endast med data från fas 2, således är fas 3 verifikation av kalibreringen.

Av resultaten framgår att det var möjligt att kalibrera ASM 2d för att simulera biologisk kväve- och fosforreduktion med resultaten från driften av Bio-PN anläggningen. Kalibreringen av kväveavskiljningen var enkel och krävde inga ändringar av modellens processkonstanter.

Kalibreringen av den biologiska fosforavskiljningen krävde ändring i några få av modellens standardvärden. Modellkonstanter för avloppsvattenkaraktiseringen ändrades för att få en korrekt beskrivning av avloppsvattenkvaliteten av COD och för att få rätt slamproduktion. Därefter kunde modellens beskrivning av den biologiska fosforavskiljningen ytterligare förbättras genom att utnyttja resultaten av P-släppsförsök i kalibreringen.

Samma modellkalibrering kunde inte utnyttjas för pilotanläggningen med biologisk fosforavskiljning med kort slamålder utan kvävereduktion, även om anläggningen var belastad med samma avloppsvatten. Speciellt innehållet av icke nedbrytbar COD i avloppsvattnet skulle höjas väsentligt för att motsvara det faktiska utsläppet från anläggningen.

## SLUTSATSER

Slammets sjunkegenskaper, utgående halt löst COD och utgående halt kväve påverkas främst av slamåldern.

- DSVI var generellt sett högre i Bio-PN anläggningen jämförelse med Bio-P anläggningen.
- DSVI i Bio-PN anläggningen var betydligt mer stabilt än i Bio-P anläggningen.
- Den lösta COD halten och kvävehalten i utgående vatten var lägre i Bio-PN anläggningen i jämförelse med Bio-P anläggningen.

Den kvantitativa biologiska fosforavskiljningen påverkas främst av inkommande vattens kvalitet.

- Fosforavskiljningen är eventuellt något bättre i Bio-P anläggningen i jämförelse med Bio-PN anläggningen under de perioder som kolkälla är begränsande.
- Glukos verkar fungera lika bra som acetat. Eventuellt är utgående halt fosfor något mer stabil då glukos doseras i jämförelse med acetat.

En datormodell för simulering av Bio-P processen gick relativt enkelt att anpassa till Bio-PN anläggningen.

- Modellkonstanter för avloppsvattenkaraktiseringen ändrades för att uppnå en korrekt beskrivning av avloppskvaliteten av COD och för att få rätt slamproduktion.
- Modellens beskrivning av den biologiska fosforavskiljningen kunde ytterligare förbättras genom att utnyttja resultaten av P-släppsförsök i kalibreringen. Efter kalibrering var modellen bra på att beskriva de faktiska processvariationerna också under belastningsförhållanden som kraftigt avviker från de förhållanden som rådde vid kalibreringen.
- Samma modellkalibrering kunde emellertid inte utnyttjas för att simulera driften av pilotanläggningen med biologisk fosforavskiljning med kort slamålder trots att den anläggningen var belastad med samma avloppsvatten. Speciellt innehållet av icke nedbrytbar COD är viktigt för kalibreringen.

Det är idag inte möjligt att enbart med hjälp av modellen ASM 2d och avloppsvattenkaraktisering kvantitativt bedöma potentialen för biologisk fosforavskiljning vid en given anläggning.

- Datormodellen ger möjlighet för att utvärdera förväntade förändringar av mängden Bio-P bakterier och förväntade förändringar av inlagringsprodukter i form av PHB. Det finns dock inte något tydligt samband mellan modellens beskrivning av populationsdynamiken och den uppmätta variationen. Likaså finns det inget tydligt samband mellan de modellerade och uppmätta mängderna av PHB i biomassan. Det antas i båda fallen bero på att den tillgängliga datormodellen inte beskriver Bio-P processen speciellt fullständigt; men också på att de mätmetoder som har utnyttjats för beskriva populationsdynamiken och inlagringsprodukterna knutna till bio-P inte fångar de verkliga processerna i slammet speciellt väl.

## BILAGA 1. PUBLIKATIONER SOM HAR DIREKT URSPRUNG I PROJEKTET

Dircks, K. (2000). *Respiration and storage of organic matter in activated sludge*. Doktorsavhandling. Department of Environmental Science and Engineering, Technical University of Denmark, Lyngby. s. 1–23 + appendix ([library@er.dtu.dk](mailto:library@er.dtu.dk)).

Dircks, K., Henze, M., van Loosdrecht, M.C.M., Mosbæk, H. och Aspegren, H. (2001). *Storage and degradation of poly- $\beta$ -hydroxybutyrate in activated sludge under aerobic conditions*. Wat. Res. 35, 2277–2285.

Henze, M., H. Aspegren, Jansen J. la C., Nielsen, P.H. och Lee, N. (2002). *Effect of solids retention time and wastewater characteristics on biological phosphorus removal*. Wat. Sci. Tech. 45 (6) 137–144.

Lee N., Nielsen P.H., Andresen K.H., Juretschko S., Nielsen J.L., Schleifer K.-H., och Wagner M. (1999). *Combination of Fluorescent In Situ Hybridization and Microautoradiography – a New Tool for Structure-Function Analyses in Microbial Ecology*. Applied and Environmental Microbiology 65 (3) 1289–1297.

Lee, N., Jansen J. la C., Aspegren, H., Henze, M., Nielsen, P.H. och Wagner, M. (2002). *Population dynamics in wastewater treatment plants with enhanced biological phosphorus removal operated with and without nitrogen removal*. Wat. Sci. Tech. 46 (1–2) 163–170.

Lee N., Nielsen P.H., Aspegren H., Henze M., Schleifer K.-H. och Jansen J. la C. (2003). *Long-term Population Dynamics and in situ Physiology in Activated Sludge Systems with Enhanced Biological Phosphorus Removal Operated with and without Nitrogen Removal*. Syst. Appl. Microbiol. 26, 211–227.

Tykesson E. (2002). *Combined biological- and chemical phosphorus removal in wastewater treatment – Swedish experience and practical application of phosphorus-release batch test*. Licentiatuppsats, Vattenförsörjnings- och Avloppsteknik, LTH, TVVA-3007, ISSN:1650-5050.

Tykesson, E., Aspegren, H., Henze, M., Nielsen P.H. och Jansen J. la C. (2002). *Use of phosphorus release batch tests for modelling EBPR Pilot Plants*. Wat. Sci. Tech. 45 (6) 99–106.



Box 47607 117 94 Stockholm

Tfn 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)

ISBN: 91-85159-11-5