

ENERGIEFFEKTIVISERING AV LUFTNINGSGSTEGET PÅ KÄPPALAVERKET, LIDINGÖ

Energy optimization of the aeration at
Käppala wastewater treatment plant, Stockholm

av ANDREAS THUNBERG¹, ANNA MARIA SUNDIN¹ och BENGT CARLSSON²

¹ Käppalaförbundet, Box 3095, 181 03 Lidingö

e-post: andreas.thunberg@kappala.se, annamaria.sundin@kappala.se

² Institutionen för informationsteknologi, Uppsala universitet, Box 337, 751 05 Uppsala

e-post: Bengt.Carlsson@it.uu.se



Abstract

In conventional wastewater treatment plants the aeration of the biological treatment process is often one of the largest energy consumers. As a part of making Käppala WWTP more energy efficient three full-scale optimization experiments of the biological treatment process have been performed. In this article, the different strategies are described and evaluated and the results compared. The first two strategies that were tested: i) individual oxygen control and ii) ammonia- and oxygen- feedback control, gave a reduction of the total airflow of 16% and 9% respectively. Thereafter the two strategies were combined to: iii) individual oxygen control with ammonia- and oxygen- feedback. The third strategy gave the best results with a reduction in the airflow consumption of 18% and with a preserved degree of nutrient removal.

Key words – aeration, individual oxygen control, ammonia-feedback, oxygen-feedback, K_{1a} -function

Sammanfattning

I konventionella avloppsreningsverk står luftningen av biosteget för en stor del av den totala elenergiförbrukningen. Som ett led i att göra avloppsreningsverket Käppalaverket mer energieffektivt har tre fullskaliga optimeringsförsök av luftningen i biosteget utförts, med syftet att minska luftförbrukningen med bibehållen reningsgrad. I denna artikel beskrivs strategierna och resultaten jämförs. De två första utvärderade strategierna: i) individuell syrestyrning och ii) styrning med ammonium- och syre- återkoppling, gav en minskning av det totala luftflödet på 16% respektive 9%. När sedan de två strategierna kombinerades till: iii) individuell syrestyrning med återkoppling, erhöles en luftflödesminskning på 18% och med bibehållen reningsgrad.

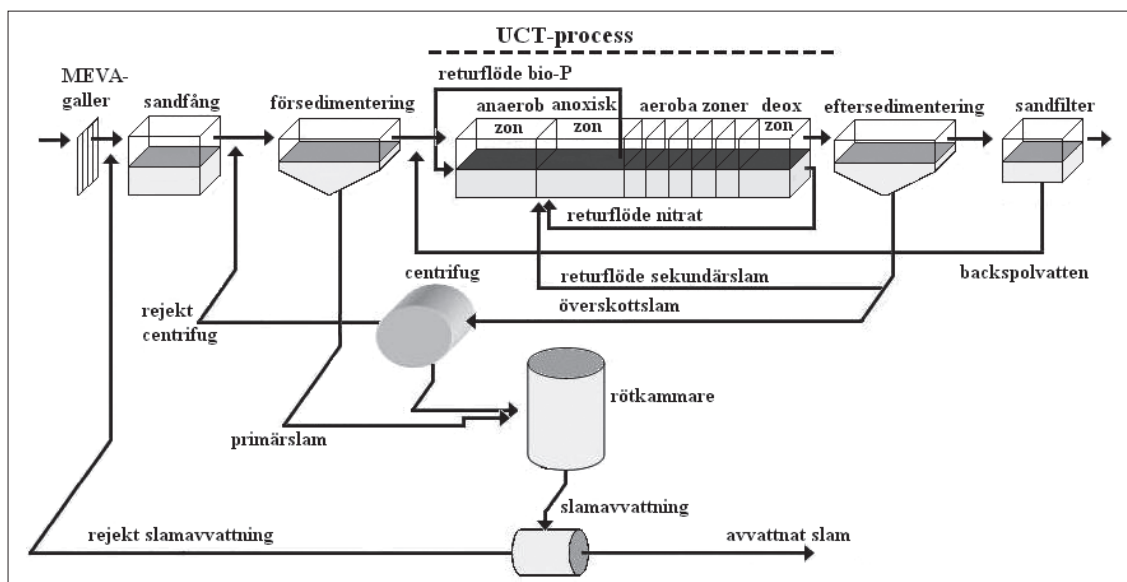
Inledning

En sammanställning över elenergiförbrukningen på Käppalaverket visade att blåsmaskinerna står för ca 20% av den totala elenergiförbrukningen i verket. Med dagens höga reningskrav leder årstidsvariationerna i belastningen på verket till att luftningen i de aeroba zonerna vid vissa betingelser är överdimensionerad och ineffektiv ur energisynpunkt. Problemet är ett välkänt fenomen (Sahlman m.fl., 2004, Vrecko m.fl., 2006 och Björnlenius m.fl., 2006) som medför onödiga kostnader i avlopps-

reningsverk med aktivslamprocess. Genom att modifiera regleringen av luftflödet till biobassängerna kan en mer anpassad luftförbrukning fås och pengar sparas utan att reningsgraden påverkas negativt.

Käppalaverket

Käppalaverket är beläget nordost om Stockholm på Lidingö och drivs av ett kommunförbund, Käppalaförbundet, bestående av de tolv medlemskommunerna



Figur 1. Käppalaverkets processutformning. I gamla delen av verket används den så kallade UCT-processen för biologisk fosforavskiljning.

Sigtuna, Vallentuna, Upplands-Bro, Upplands Väsby, Täby, Sollentuna, Danderyd, Solna, Lidingö, Nacka, Värmdö och Järfälla. År 2002 stod en större ombyggnation av verket färdig för att kunna hantera storstadsregionens ökande belastning och reningskrav. Förutom att den redan befintliga delen byggdes om utökades verket med fem nya bioblock. Efter ombyggnationen är Käppalaverket dimensionerat för den förväntade belastningen år 2020 på 700 000 p e. Nuvarande belastning är ca 520 000 p e vilket betyder att verket i vissa avseenden är överdimensionerat. Käppalaverkets processutformning visas i figur 1. I den gamla delen av verket används UCT-processen med biologisk fosforavskiljning. I nya delen sker fosforavskiljningen via en simultanfällning med järnsulfat i returslamflödet. Kväveavskiljningen görs med en fördenitrifikation där den anoxiska zonen ligger innan den aeroba.

Luftarsystemet

Antalet aeroba zoner varierar mellan fyra och sex. I gamla delen av verket kan den första aeroba zonen även drivas anoxiskt och i nya delen den första och den näst sista zonen. Den för nitrifikationen nödvändiga syresättningen av avloppsvattnet görs med bottenmonterade gummimembrandysor på sex meters djup i gamla delen och på elva meters djup i nya delen. Luftarsystemet är ett finbubbligt system där tre blåsmaskiner tillgodoser luftbehovet i gamla delen och fyra i nya delen. Eftersom det

inte finns några omrörare i de aeroba zonerna är det minsta tillåtna luftflödet per dysa satt till 0,75 respektive 1,2 Nm³/h för att motverka sedimentation. Tätheten av dysorna i de aeroba zonerna varierar dels mellan biobassängerna men även mellan zonerna i en enskild bassäng. Antalet dysor per kvadratmeter minskar i slutet av bassängen i takt med att belastningen av BOD och ammonium avtar, se tabell 1.

Syreregleringen

Även syrerregleringen har dimensionerats med belastningsskillnaderna i zonerna i åtanke. Syrestyrningsstrategin har därför en struktur där mest luft går in till de första aeroba zonerna och minst till de sista med syftet att hålla en jämn syrekonzentration i hela bassängen. Två syregivare används till syrerregleringen där en är placerad i första aeroba zonen och en i sista. Den första syregivaren styr det totala luftflödet till den aeroba bassängen och den andra syregivaren hur stor andel varje zon får. Om syregivaren i sista zonen avviker från sitt syrebörvärde ändras lutningen på trappan, Δ i figur 2, vilket också påverkar syrehalten i första luftade zonen. Den första syregivaren ökar eller minskar då det totala luftflödet till den aeroba bassängen. I figur 2 illustreras principen för de två extremfall som kan gälla vid låg respektive hög belastning.

I figur 2 visas fyra zoner vilket endast gäller vissa bioblock och under vissa delar av året, men principen är

Tabell 1. Antal dysor per kvadratmeter och maximala luftflöden i samtliga luftade zoner. Samtliga block är dimensionerade för en högre belastning i början av den luftade bassängdelen. Nya delen innefattas av BB07–BB11.

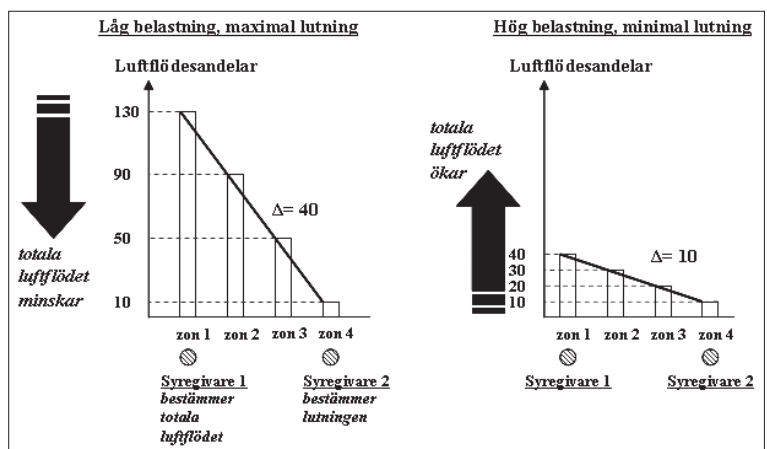
Bioblock	Zon 1		Zon 2		Zon 3		Zon 4		Zon 5		Zon 6	
	Dysor/ m ²	Maxflöde [Nm ³ /h]	Dysor/ m ²	Maxflöde [Nm ³ /h]	Dysor/ m ²	Maxflöde [Nm ³ /h]	Dysor/ m ²	Maxflöde [Nm ³ /h]	Dysor/ m ²	Maxflöde [Nm ³ /h]	Dysor/ m ²	Maxflöde [Nm ³ /h]
BB01	3	2100	2,3	2900	2	1500	1	700	1,5	1300		
BB02	3,1	1600	2,5	2300	2	1800	1,7	1000	1,5	1100		
BB03	3,2	1300	2,8	1800	2,3	1400	1,9	1000	1,7	1000	1,5	1000
BB04	3,6	1400	2,8	1800	2,3	1600	2	1100	0,9	1000	1,7	1100
BB05	3,2	1300	2,8	1700	2,3	1400	1,9	1000	1,7	1000	1,7	1000
BB06	3,1	1600	2,5	2300	2	1800	1,7	1000	1,5	1100		
BB07–BB11	1,6	2100	1,3	2600	1,2	2300	0,9	1800	0,8	1500		

densamma för alla bioblocken. Vid låg belastning ökar syrekonzentrationen i den sista aeroba zonen, zon 4. Styrsystemet ställer då in maximal lutning på trappan, $\Delta = 40$, vilket ökar andelen luft och därmed även syrekonzentrationen i zon 1. Syregivaren i zon 1 kallar då på mindre luft till hela aeroba bassängen för att kunna hålla sitt syrebövråde. Det motsatta gäller vid hög belastning där systemet minskar lutningen till minimum, $\Delta = 10$. Den minskade andelen luft in till zon 1 gör att syrekonzentrationen sjunker och syregivaren i zon 1 blir därmed tvungen att kalla på mer luft totalt sett in till blocket för att kompensera.

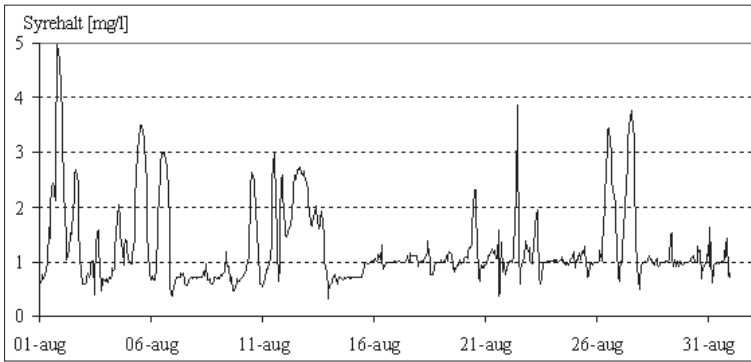
Förhöjda syrekonzentrationer

Syrestyrningsstrategin fungerar mycket väl ur renings-synpunkt. Kväveavskiljningsgraden på Käppalaverket ligger över 80 % vilket är en hög siffra för ett avloppsreningsverk med fördenitrifikation. Men under perioder då nitrifikationen är effektiv, dvs. vid höga vattentempe-

raturer och höga slamhalter uppstår situationer där merparten av det organiska kolet och ammoniumet oxideras redan i den första aeroba zonen. I de efterliggande zonerna som då inte tillförs några syretärande ämnen stiger därmed syrekonzentrationen. Den sista aeroba zonen har då sänkt sitt luftflöde till det minsta tillåtna för omröring, medan mellanliggande zoner är begränsade av trappningsstrukturen och hålls långt över minflödet. Syrehalten stiger därmed kraftigt och kan i den sista aeroba zonen ligga flera hundra procent över bövrädet. Dessa förhöjda syrehalter medför inte bara en onödig kostnad i elenergi, utan kan även hämma denitrifikationen genom att syrerikt vatten returneras till den anoxiska zonen. Luftningen medför dessutom en stabilisering av det organiska materialet i slammet, vilket även det missgynnar denitrifikationen. I figur 3 visas en period med dessa förhöjda syrekonzentrationer. Syrebövrädet i den sista aeroba zonen var satt till 0,7 mg/l fram till den 15 augusti och 1,0 mg/l därefter.



Figur 2. Andelar av det totala luftflödet i respektive aerob zon vid hög eller låg belastning (modifierad från Borglund, 2005).



Figur 3. Syrehalten i den sista luftade zonen i bioblock 1 under augusti månad. Kraftiga syretoppar uppkommer ofta och syrehalten ligger långt över önskat börvärde 0,7–1,0 mg/l.

Teori

Syreöverföring till vatten

Hastigheten med vilken syre överförs till vatten styrs av den olinjära $K_L a$ -funktionen och är en funktion av luftflödet. Ofta antas att förhållandet mellan syreöverföringshastighet och luftflöde är linjärt, något som inte stämmer i verkligheten. $K_L a$ -funktionens olinjära koppling till luftflödet kan t.ex. beskrivas med följande uttryck (Lindberg, 1997):

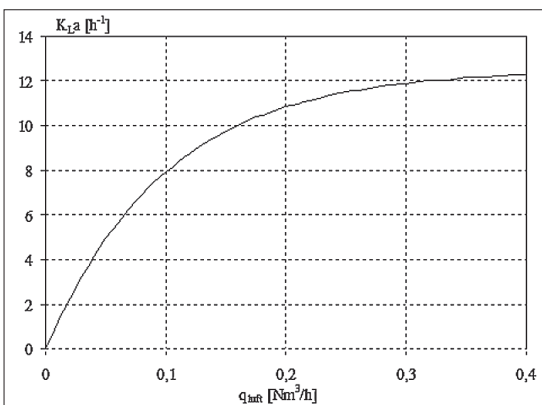
$$K_L a(q_{\text{luft}}) = k_1(1 - e^{-k_2 q_{\text{luft}}}) \quad (1)$$

där

$$\begin{aligned} q_{\text{luft}} &= \text{luftflöde [m}^3/\text{h]} \\ k_1 &= \text{konstant [1/h]} \\ k_2 &= \text{konstant [h/m}^3] \end{aligned}$$

Ett exempel på uttryckets olinjära utseende visas i figur 4.

En ändring i luftflödet påverkar vattnets syrekonzentration i en totalomblandad bassäng enligt ekvation 2



Figur 4. $K_L a$ -funktionens exponentiella utseende. Inte förrän vid låga luftflöden minskas $K_L a$ -funktionen nämnvärt.

(Olsson & Newell, 1999). För att hålla en viss konstant syrekonzentration i en luftad bassäng krävs att termen i vänsterledet är noll. Om inkommande syrekonzentration, $DO_{in}(t)$, är konstant och om samtidigt koncentrationen av löst syre i vattnet ligger nära mättnadsgraden, DO_{sat} , krävs en större syreöverföringshastighet, termen $K_L a(q_{\text{luft}}(t))$, för att hålla koncentrationen konstant jämfört med när syrekonzentrationen ligger långt under mättnadsgraden. Eftersom höga syrekonzentrationer är kopplat till stora luftflöden innebär detta, tillsammans med $K_L a$ -funktionens olinjära struktur, att det krävs betydligt större luftflöden för att parera en ökning av syreförbrukningen, dvs. en belastningsökning, vid höga syrekonzentrationer jämfört med vid låga.

$$\begin{aligned} \frac{d(DO(t))}{dt} &= K_L a(q_{\text{luft}}(t)) \cdot [DO_{sat} - DO(t)] + \\ &+ \frac{Q}{V} \cdot [DO_{in}(t) - DO(t)] - R(t) \end{aligned} \quad (2)$$

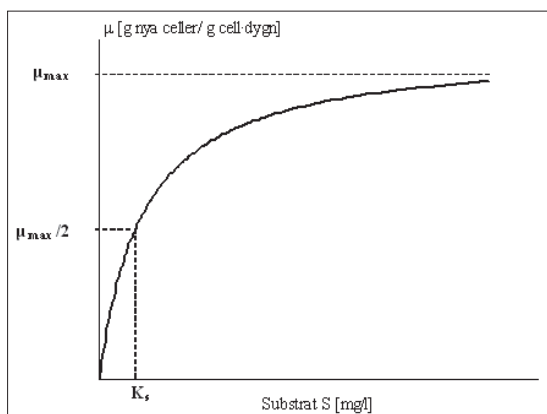
ovan gäller

$$\begin{aligned} K_L a(q_{\text{luft}}(t)) &= \text{syreöverföringshastighet som funktion av luftflöde [h}^{-1}] \\ DO_{sat} &= \text{syremättnadskoncentration [mg/l]} \\ DO(t) &= \text{syrekonzentration i vatten [mg/l]} \\ DO_{in}(t) &= \text{syrekonzentration i inkommande vatten [mg/l]} \\ R(t) &= \text{syreförbrukningshastighet pga. mikrobiell aktivitet [mg/l} \cdot \text{h]} \\ Q(t) &= \text{vattenflöde [m}^3/\text{h]} \\ V &= \text{luftad volym [m}^3] \\ q_{\text{luft}}(t) &= \text{luftflöde [Nm}^3/\text{h]} \end{aligned}$$

Med den aktuella syrestyrningsstrategin på Käppalaverket hålls höga luftflöden i de första aeroba zonerna för att sedan successivt minskas i de sista, oavsett vilka förhållandena är. Enligt teorin för $K_L a$ -funktionen och syreöverföringen beskriven i ekvation 2 är denna struktur inte fördelaktigt ur energisynpunkt. Massan överförd syre per tillsatt volym luft minskar desto högre luft-

Reglerstrategierna

Med syftet att motverka de syretoppar som uppkommit under perioder med låg belastning och minska den totala elenergiförbrukningen, har tre olika strategier testats fr.o.m. vecka 37 t.o.m. vecka 50 hösten 2006. Strategierna har sedan jämförts med avseende på renings- och kostnadseffektivitet. Provtagare har varit utplacerade i försöksblocket BB01 och referensblocket BB02 för att följa eventuella belastningsskillnader på blocken. De totala luftflödena har normerats mot sådana skillnader för att kunna säkerställa att en eventuell minskning i luftflödet beror på strategierna och inte olika belastning.



Figur 5. Principiell monodkinetik.

flöden och syrehalter som hålls. Trappningen av luftflödesandelar som används på Käppalaverket ger därför en mycket lägre effektivitet i syreöverföringen i de första luftade zonerna jämfört med de sista.

Nitrifierarnas tillväxtkinetik

Hastigheten med vilken tillväxt och död av mikroorganismerna sker är en nyckelparameter för att en lyckad biologisk rening skall uppnås (Poduska & Stenstrom, 1980). Tillväxthastigheten är kopplad till flera faktorer där syrehalt och mängden tillgängligt substrat är två av de viktigaste. Mikroorganismernas tillväxt följer en så kallad monodkinetik där tillväxthastigheten ökar i takt med mängden tillgängligt substrat, men bara upp till en viss maximal tillväxthastighet (Henze m.fl., 1987). I en sådan kinetik kan även inhiberande substanser tas med, som t.ex. löst syre för denitrifierarna. Nedan visas sambandet för en allmän monodkinetik, och illustreras i figur 5.

$$\mu = \mu_{\max} \frac{S}{S + K_S} \quad (3)$$

där

μ = specifik tillväxthastighet [g nya celler / (g cell · dygn)]

μ_{\max} = maximal tillväxthastighet [g nya celler / (g cell · dygn)]

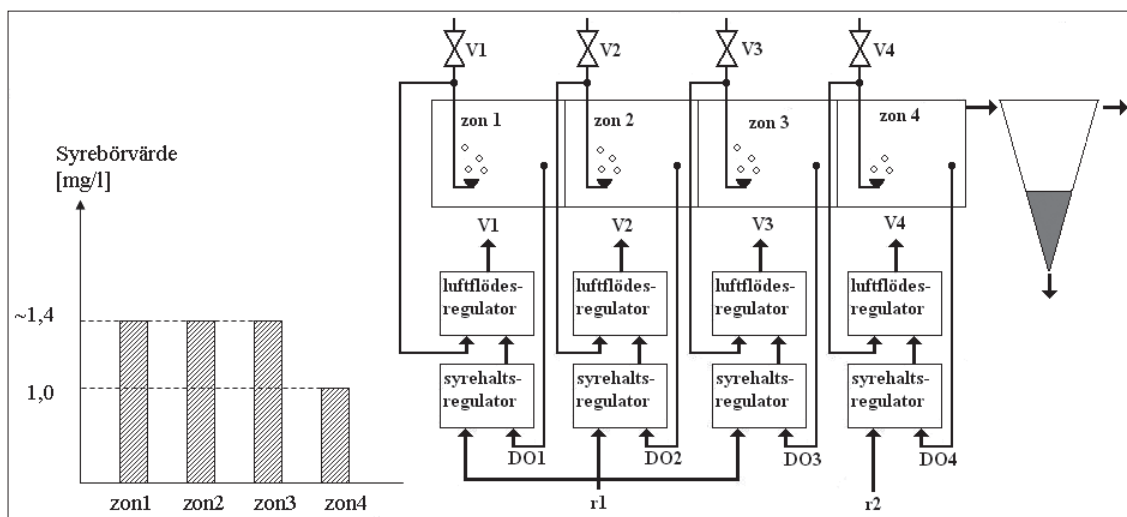
S = koncentrationen substrat [mg/l]

K_S = konstant för halva mättnadskoncentrationen av substrat [mg/l]

Tack vare strukturen på denna tillväxtkinetik finns utrymme att sänka en hög syrekonzentrationen i aeroba zoner utan att riskera en signifikant försämrad nitrifikation.

Strategi 1 – individuell syrestyrning

Genom att installera extra syregivare i försöksblocket, BB01, har varje aerob zon styrt sitt luftflöde mot ett av processoperatören förinställt börvärde via en s.k. kaskadreglering (Olsson & Newell, 1999). I en sådan reglering fungerar en syrehaltsregulator som överordnad regulator och sätter börvärdet till en underordnad luftflödesregulator. Strategin illustreras i figur 6. Samtliga regulatorer är av typen PI. Från en luftflödesgivare går en framkoppling till den underordnade regulatorn för att snabbare motverka störningar i luftflödet. Med regleringen kan även eventuella olinjäriteter i reglerventilen motverkas innan de ger utslag i syrekonzentrationen. Tack vare att luftflödet in till respektive aerob zon styrs oberoende av omkringliggande zoner säkerställs att syrehalterna hålls på de önskade nivåerna i samtliga zoner så att ingen zon blåser in mer luft än vad som är nödvändigt för dess aktuella syrebehov. Här ligger därför direkt en möjlig energibesparing. Vid låg belastning kan luftflödet strypas tillräckligt i zon 2 och 3 så att syretopparna motverkas. Valet av syrebörvärden är av stor betydelse för uppkomsten av syretoppar. Om höga syrebörvärden sätts till de första aeroba zonerna kan vid låg belastning alla syretärande ämnen oxideras tidigt. Eftersom de efterliggande zonerna fortfarande är begränsade av sitt minluftflöde kan syretoppar då ändå uppstå. Genom att frångå strukturen med högre syrebörvärden i de första aeroba zonerna och samtidigt minska dem mer än vad som gjorts tidigare kan detta motverkas. Zon 1, 2 och 3 har därför styrt mot samma, låga, syrebörvärde. En sådan struktur leder till att de kraftiga luftflödena i de första aeroba zonerna sänks och de låga luftflödena i de sista aeroba zonerna höjs. Tack vare den högre effektiviteten i syreöverföringen vid låga luftflöden blir denna ökning mindre än sänkningen i de första zonerna och med nettoeffekten att lika mycket syre överförs fast med minskade totala luftflöden. Syrebörvärdena sänktes sedan successivt under försökets gång.



Figur 6. Individuell styrning. Samtliga zoners luftflöden styrs oberoende av varandra med en kaskadreglering av luftflödet.

Syrebövärdet r_1 till de aeroba zonerna 1, 2 och 3 fick startvärdet 1,5 mg/l och minskades veckovis med 0,1 mg/l tills det att utgående ammoniumkoncentration ökade. Aerob zon 4 hade under hela försöksperioden bövärdet 1,0 mg/l. I tabell 2 visas syrebövärderna i zonerna under försöket.

Strategi 2 – återkoppling från utgående ammonium

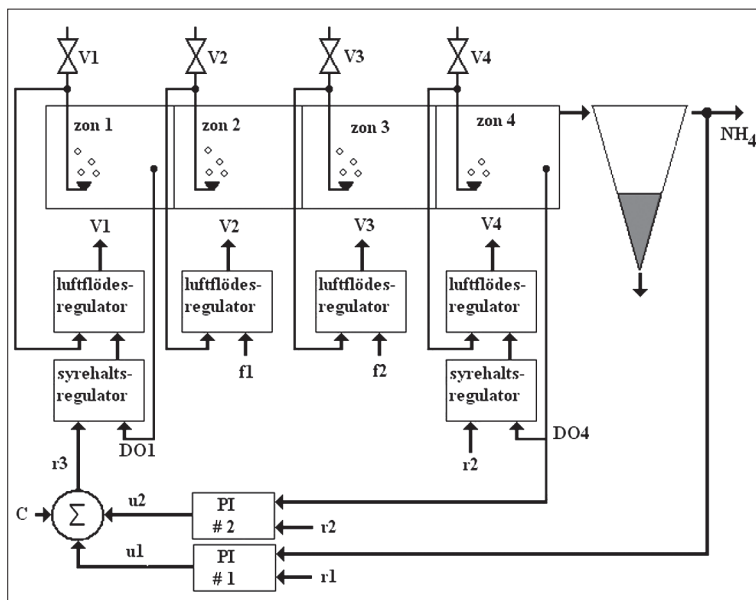
Eftersom syrebövärderna till bioblocken styrs på daglig basis av en processoperatör följer dessa i viss mån belastningen på verket. Belastningen varierar dock vanligtvis över dygnet och med en automatisk reglering av syrebövärderna ökar överensstämmelsen och risken för onödig luftning och förhöjda syrehalter minskar. När processoperatören ändrar syrebövärdet i första aeroba zonen är den tyngsta styrande faktorn ammoniumhalten i utgående vatten. En återkoppling från utgående ammonium

halt har därför använts till att reglera syrebövärdet i första aeroba zonen, zon 1, se även (Lindberg & Carlsson, 1997). Strategin illustreras i figur 7. Utgående ammoniumkoncentration styr via en PI-regulator syrebövärdet i zon 1 så att ammoniumkoncentrationen går mot ett satt bövärdet. Med denna strategi anpassas syrebövärdet i zon 1 efter den aktuella belastningen av ammonium vilket leder till att elenergi sparas. Strategin med enbart en ammoniumåterkoppling har dock brister och syretoppar kan ändå uppstå. Ibland stiger koncentrationen mycket snabbt och eftersom vattnet måste färdas genom hela bioblocket innan det når ammoniummätaren sänks inte syrebövärdet tillräckligt fort. För att motverka detta har ytterligare en återkoppling gjorts. Syrehalten i den sista aeroba zonen speglar koncentrationen av ammonium och organiskt material i vattnet, där höga koncentrationer leder till låga syrehalter och vice versa. Med en extra återkoppling styrs därför syrebövärdet i zon 1 även av en syrehaltsåterkoppling från zon 4. De mellanliggande zonerna, zon 2 och 3, styrs fortfarande av trappningsstrukturen.

PI-regulator 1 styr utgående ammoniumhalt mot bövärdet r_1 med styrsignalen u_1 . Valet av bövärdet till regulatorn är avgörande för uppkomsten av syretoppar. Under helgerna när syretopparna är som vanligast är utgående ammoniumkoncentration mycket nära noll. Att använda detta värde skulle inte motverka syretopparna eftersom regulatorn då låter bli att sänka sin styrsignal u_1 ytterligare. För att motverka syretopparna sattes bövärdet r_1 därför högre än noll så att syreförbrukande ämnen alltid finns kvar i sista luftade zonen.

Tabell 2. Syrebövärderna i försöks- och referensblock under utvärderingen av strategi 1.

	BB01 [mg/l]				BB02(ref.) [mg/l]	
	zon1	zon2	zon3	zon4	zon1	zon4
V.37	1,5	1,5	1,5	1,0	1,7	1,0
V.38	1,4	1,4	1,4	1,0	1,7	1,0
V.39	1,3	1,3	1,3	1,0	1,7	1,0
V.40	1,3	1,3	1,3	1,0	2,0	1,0



Figur 7. Återkopplingsstrategi. Återkoppling av utgående ammoniumhalt och syrehalt i sista aeroba zonen styr börvärdet till syrehaltsregleringen i första luftade zonen.

PI-regulator 2 styr syrekonsentrationen i sista zonen, DO4, mot börvärdet r_2 med styrsignalen u_2 . r_2 är även börvärde till kaskadregleringen i zon 4. En offset C adderas till regulatorernas styrsignaler, u_1 och u_2 , och summan utgör börvärdet r_3 till kaskadregleringen i zon 1, dvs.

$$r_3 = C + u_1 + u_2 \quad (4)$$

där

- r_3 = syrebörvärdet i zon 1 [mg/l]
- C = konstant [mg/l]
- u_1 = styrsignal från regulator 1 [mg/l]
- u_2 = styrsignal från regulator 2 [mg/l]

Parametern C sätter börvärdet r_3 i rätt område och underlättar vid uppstarter av strategin. Under försöksperioden var r_1 satt till 0,2 mg/l, r_2 till 1,0 mg/l och C till 1,8 mg/l. Börvärdena f_1 och f_2 till trappningsstrategin i zon 2 och 3 beräknas enligt den reguljära strategin.

Strategi 3 – individuell syrestyrning med återkoppling

Den individuella syrestyrningen i strategi 1 utnyttjar en ökad effektivitet i syreöverföringen och motverkar syretopparna eftersom den förskjuter belastningen av syretärande ämnen mot slutet av den aeroba bassängen. Strategin medför dock en ökad risk för att utgående ammoniumhalt skall stiga eftersom belastningen förskjuts nedåt. Strategi 2 däremot, med de två återkopplingarna, säkerställer alltid utgående ammoniumkoncentration.

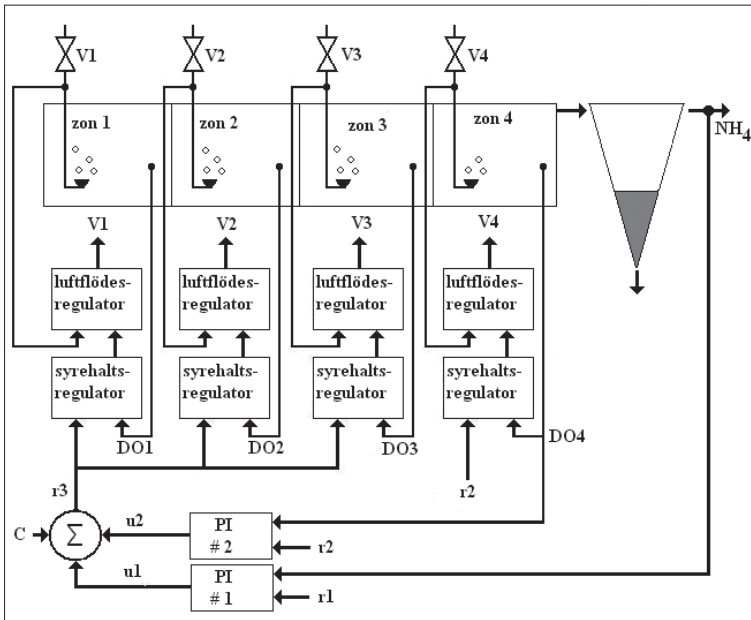
Genom att kombinera de två strategierna fås en styrning med hög effektivitet i syreöverföringen som motverkar syretoppar och håller utgående ammoniumkoncentration låg. Strategin visas i figur 8.

Den individuella syrestyrningen används igen och reglerar luftflödet i varje zon via en kaskadreglering. De två återkopplingarna ligger som en överordnad styrning och sätter syrebörvärdet r_3 till zon 1, 2 och 3. Börvärdet r_3 beräknas kontinuerligt på samma sätt som tidigare enligt ekvation 4. PI-regulator 2 styr som i strategi 2 syrehalten i aerob zon 4, DO4, mot det statiska börvärdet r_2 , och PI-regulator 1 styr utgående ammoniumkoncentration mot börvärdet r_1 . Börvärdet r_1 sattes till 0,2 mg/l, r_2 till 1,0 mg/l och C till 1,4 mg/l.

Resultat

Syretoppar

Strategi 1 och 3 använder sig av den individuella syrestyrningen. Här förskjuts belastningen kraftigt mot de sista aeroba zonerna, något som effektivt motverkade uppkomsten av syretoppar. I figur 9 visas syrekonsentrationen i den sista aeroba zonen under försöksperioden för strategi 1. I försöksblocket BB01 håller sig syrekonsentrationen mycket nära börvärdet 1,0 mg/l. Under samma period uppstår kraftiga syretoppar ofta i referensblocket BB02. I slutet av utvärderingstiden sjunker dock konsentrationen något under börvärdet 1,0 mg/l i försöksblocket. Belastningen på verket hade då ökat kraf-



Figur 8. Individuell syrestyrning med återkoppling.

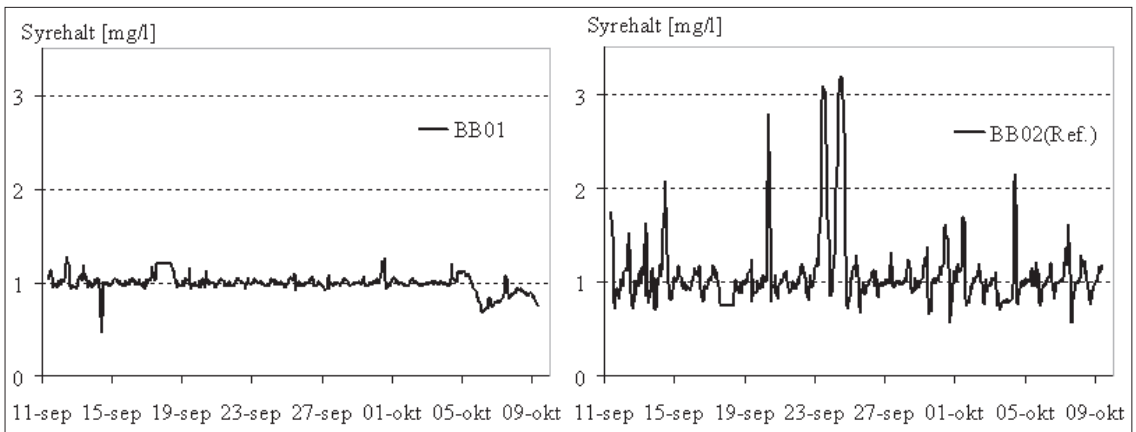
tigt och en för stor del av belastningen låg på den sista aeroba zonen. Sådana problem motiverar strategi 3 där ammonium- och syrehaltsåterkopplingarna pareras för eventuella belastningsvariationer.

Utvärderingen av strategi 2 visade att av syretopparna kan uppstå mycket snabbt. Strategin, som helt baseras på två återkopplingar, var för långsam när syretopparna väl börjat uppstå. Trots att återkopplingarna vid sådana tillfällen sänkte syrebövärdet till första aeroba zonen var vattnets uppehållstid mellan första och sista zonen för lång för att det skulle ge någon effekt och mindre syre-toppar uppstod ändå. Återkopplingarna förskjuter inte

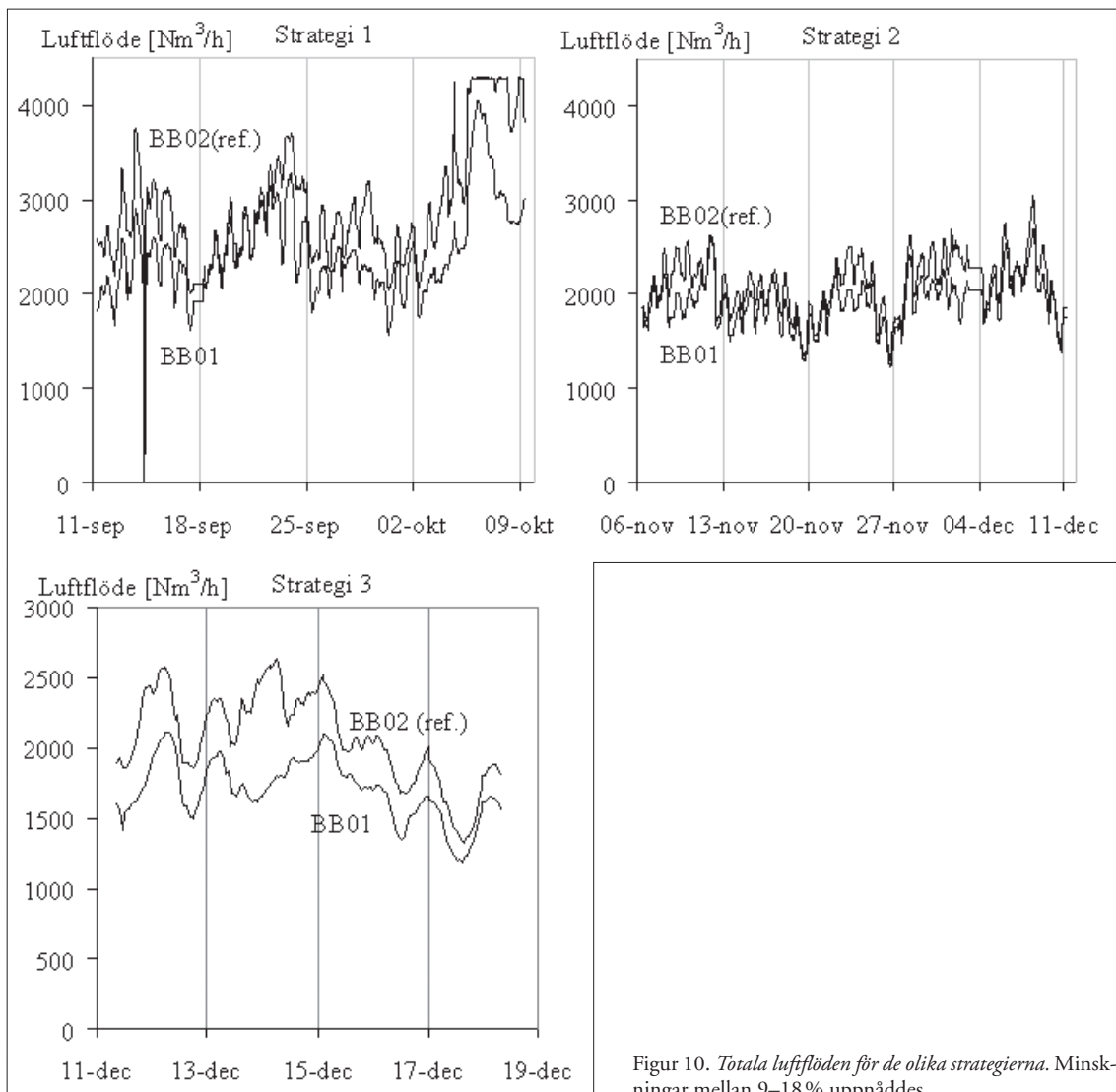
belastningen nedåt förrän syrehalten redan börjat stiga i sista aeroba zonen eller ammoniumhalten i utgående vatten ökat, vilket visade sig vara för sent. Strategi 1 och 3 däremot är prediktiva, dvs. åtgärden att motverka syre-toppar är utförd innan de uppkommer och fungerar därför väl.

Total luftförbrukning

För samtliga strategier minskades de totala luftflödena. I strategi 1 och 3 där den individuella syrestyrningen användes gavs störst minskningar vilket visas i figur 10.



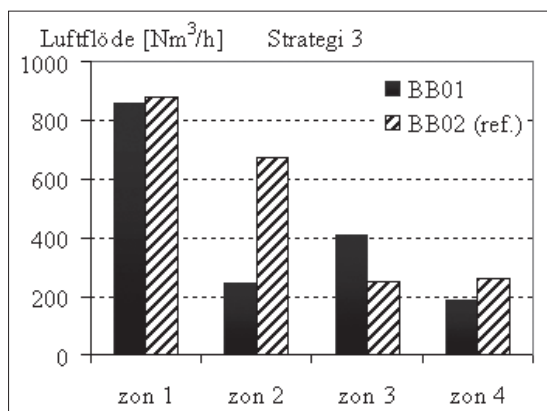
Figur 9. Syrekonzentrationer i zon 4 i försöksblock och referensblock då individuell syrestyrning tillämpas.



Figur 10. Totala luftflöden för de olika strategierna. Minskningar mellan 9–18% uppnåddes.

Strategi 1 minskade luftflödena i genomsnitt med 16% och strategi 3 med 18%. Dessa minskningar kan till stor del tillskrivas strukturen på börvärdena som försköt belastningen mot de sista aeroba zonerna så en högre effektivitet i syreöverföringen kunde erhållas. Speciellt vid högre belastning då högre luftflöden krävdes blev skillnaden mellan försöks- och referensblock stor vilket var förväntat enligt teorin för K_{La} -funktionen. Den stora minskningen av luftflödet i de första aeroba zonerna ersattes därmed av en betydligt mindre ökning av luftflödet i de sista. I figur 11 visas detta för strategi 3. En stor minskning av luftflödet främst i zon 2 har ersatts av en

betydligt mindre ökning av luftflödet i zon 3. Att det inte är någon stor skillnad mellan blocken i luftflödet i zon 1 beror på att luftflödet styrs på samma sätt där, med en kaskadreglering mot ett syrebörvärde. Den stora minskningen av luftflödet ligger istället i zon 2 eftersom referensblocket använder trappningsstrategin där. Om denna zon styrdes individuellt även i referensblocket skulle mycket höga syrebörvärden krävas för att hålla dessa luftflöden. Att strategi 3 uppnådde störst besparing, 18%, beror på att förutom en ökad effektivitet i syreöverföring hölls även börvärden anpassade till belastningen. Speciellt på helger, när belastningen ofta

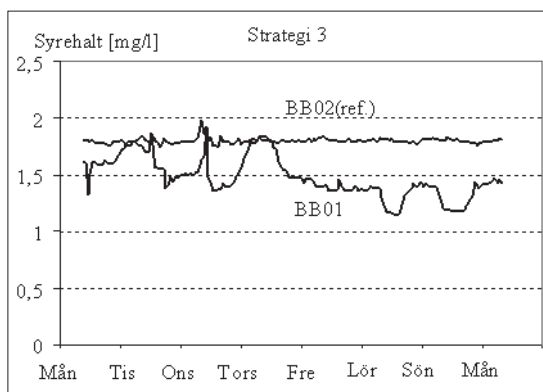


Figur 11. Luftflöden i samtliga aeroba zoner i försöks- och referensblock för strategi 3 under försöksperioden. En kraftig minskning av luftflödet i zon 2 har ersatts av en mindre ökning i zon 3.

sjönk kraftigt och ingen processoperatör övervakade processen, gjordes stora besparingar i luftflödet eftersom återkopplingarna då anpassade syrebörvärdena till belastningen. Strukturen på syrebörvärdena tillät de två återkopplingarna att sänka syrebörvärdet till zonerna 1, 2 och 3 med upp till 40 % vilket visas i figur 12. Luftflödesminskningen för strategi 2 blev 9 % och ligger enbart i att syrebörvärdet i zon 1 anpassades till den aktuella belastningen.

Reningsgrad

Ett viktigt kriterium för att strategierna skall anses lyckade är att inte reningsgraden försämras. Eftersom denitrifikationen gynnas av låga syrekoncentrationer finns ingen risk att försöken påverkar den negativt. Nitrifikationen påverkas däremot negativt enligt en monodkinetik (Henze, 1987) när syrekoncentrationen sänks och vid för låga syrekoncentrationer kan nitrifikationshastigheten kraftigt försämras. Strategi 1 och 3 som använder individuell syrestyrning håller genomgående låga syrehalter och förskjuter nitrifikationen mot slutet av aeroba bassängen. Om belastningen av syretärande ämnen ökar snabbt finns en risk att strategi 1 ger dåliga reningsresultat. Med strategi 3 däremot, säkerställs reningsgraden tack vare ammonium- och syrehalts-återkopplingarna. I figur 13 visas ett stickprov på ammonium- och nitratkoncentration för strategi 3. Det syns här hur nitrifikationen sker senare i bassängen, men att utgående ammoniumkoncentration ej påverkas. I referensblocket, BB02, är ammoniumkoncentrationen nästan lika låg i mitten av den aeroba bassängen som i slutet. Ena halvan luftas således i onödan.



Figur 12. Syrekoncentration i första aeroba zonen, strategi 3.

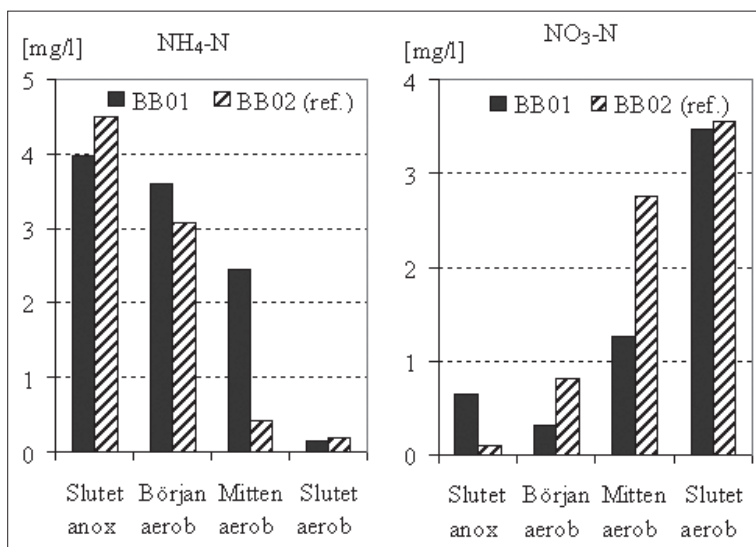
I tabell 3 visas reningsgraden för samtliga strategier. Mot slutet av utvärderingstiden för strategi 1 ökade belastningen på verket. Den stora belastningsandelen på de sista aeroba zonerna medförde då att utgående ammoniumkoncentration ökade något. Trots detta var inte reningsgraden sämre än i referensblocket totalt sett under utvärderingstiden. Tack vare ammoniumåterkopplingen i strategi 2 och 3 säkerställdes låga ammoniumkoncentrationer i utgående vatten under hela försöksperioderna. Halten organiskt material, COD, övervakas däremot inte av någon återkoppling. Men eftersom det lättoxiderbara organiska materialet oxideras innan ammoniumet räcker det med att övervaka ammoniumhalten för att säkra reningsgraden. Stickprover av COD-profilen i bioblocken visade att merparten av det organiska materialet redan var oxiderat innan de aeroba zonerna, i den anoxiska zonen.

Besparingar

De tre strategierna medförde tydliga besparingar i elenergi vilket visas i tabell 4. Elförbrukningen per kubikmeter tillförd luft från blåsmaskinerna är 0,026 kWh/m³

Tabell 3. Procentuell avskiljning under hela försöksperioden i försöks- och referensblock.

	BB01			BB02(ref.)		
	COD [%]	Tot-N [%]	NH ₄ -N [%]	COD [%]	Tot-N [%]	NH ₄ -N [%]
Strategi 1	86	82	97	86	82	98
Strategi 2	82	76	97	82	76	98
Strategi 3	83	77	97	82	75	99



Figur 13. Ammonium- och nitratprofil i försöks- och referensblock, strategi 3. Nitrifikationen är förskjuten nedåt i bassängen i försöksblocket.

vilket med 2005 års genomsnittliga elpris på 64 öre/kWh ger de årliga besparingarna som visas i tabellen. Här redovisas också uppskattade besparingar om strategierna används i samtliga sex linjer i gamla delen av verket, uträknat m h a den genomsnittliga luftförbrukningen i samtliga block i gamla delen av verket under ett år. Störst besparingar gav strategi 3, ca 550 000 SEK/år om den implementeras i samtliga bioblock i gamla delen av verket.

Man bör dock beakta den merkostnad strategierna 1 och 3 innebär i form av nya syregivare och underhållet av dessa. I tabell 5 visas beräknade kostnader från år 2004 för att installera syregivare av typen Lange. Om strategin implementeras i övriga block i gamla delen av verket skulle det innebära en inköpskostnad på ca 250 000 SEK. Därefter tillkommer 57 000 SEK/år i underhållskostnad, samt 900 SEK varje gång en givare måste bytas ut. Det var 2,5 år sedan givarna installerades och hittills har dock ingen behövt bytas. Att använda strategin i hela gamla delen av verket skulle därför betala sig redan första året.

Tabell 4. Beräknade årliga besparingar på grund av minskad luftförbrukning.

	Strategi 1	Strategi 2	Strategi 3
Besparing försöksblock [SEK]	81 000	46 000	91 000
Besparing gamla verket [SEK]	488 000	274 000	549 000

Slutsatser

Utvärderingen av försöken visade att relativt stora besparingar kan göras genom enklare ändringar i syrestyrningen. Genom att hålla lägre luftflöden i de första aeroba zonerna försköts belastningen mot de sista zonerna och energi sparades. Strukturen på börvärdena med den individuella syrestyrningen utnyttjade de sista aeroba zonernas högre effektivitet i syreöverföringen med effekten att lika mycket syre överfördes med ett totalt sett lägre luftflöde. Reningsgraden påverkades inte negativt av någon strategi. Då individuell syrestyrning tillämpades utan någon form av återkoppling av utgående ammonium- eller syrehalt försämrades dock reningsgraden något under en period med högre belastning. En återkoppling är därför nödvändig för att strategin skall kunna användas i fullskala. För att syretopparna skall kunna motverkas krävs någon form av prediktiv strategi. Vanliga återkopplingsstrategier är för långsamma för att hinna styra ner syrekoncentrationen tillräckligt snabbt. Sammantaget är därför strategin med individuell syrestyrning med återkoppling det mest energieffektiva valet.

Tabell 5. Olika kostnader för att installera nya syregivare i hela gamla delen av verket. Siffrorna grundar sig på 2004 års priser.

	Inköp [SEK]	Förebyggande underhåll [SEK/år]	Givarbyte [SEK]
En givare	25 000	5 700	900
Hela gamla verket	250 000	57 000	9000

Referenser

- Björleinius, B. & Ekman, M., (2006) »Minskad energiförbrukning och bättre kväverening genom effektivare luftning.» *VATTEN*, Vol. 62(1), 57–63.
- Borglund, A-M., (2005) *Reglering av syrehalter i Käppalaverkets biosteg*. Intern rapport, Käppalaverket.
- Lindberg C-F & Carlsson B., (1996). Nonlinear and set-point control of the dissolved oxygen dynamic in an activated sludge process. *Water, Science and Technology*, vol 34, No 3–4, pp 135–142.
- Henze, M., Grady, C. P. L., Jr. Gujer, W., Marais, G. v. R. & Matsuo, T., (1987) *Activated Sludge Model No.1*. IAWPRC Scientific and Technical Report No. 1. IAWPRC, London.
- Lindberg, C.E., (1997) "Control and Estimation Strategies Applied to the Activated Sludge Process." PhD. thesis, Uppsala University. Available on-line at www.it.uu.se/research/syscon/automatic/modcont_waste
- Olsson, G. & Newell, B. (1999) *Wastewater Treatment Systems. Modelling, Diagnosis and Control*. IWA Publishing, London, UK.
- Poduska, R. A. & Stenstrom, M. K., (1980) "The effect of dissolved oxygen concentration on nitrification." *Water Research*, Vol. 14(6), 643–649.
- Sahlmann, C., Libra, J. A., Schuchardt, A., Wiesmann, U. & Gnirrs, R., (2004). "A control strategy for reducing aeration costs during low loading periods." *Water Science and Technology*, Vol. 50(7), 61–68.
- Vrecko, D., Hvala, N., Stare, A., Strazar, M., Levstek, M., Cerar, P. & Podbevsek, S., (2006). "Improvement of ammonia removal in activated sludge process with feedforward-feedback aeration controllers." *Water Science and Technology*, Vol. 53(4), 125–132.