

# ENERGIEFFEKTIVISERAD LUFTNING PÅ STERNÖ AVLOPPSRENINGSVRK

## Energy improved aeration at Sternö Wastewater Treatment Plant

av VIKTOR LARSSON<sup>1</sup>, ALEKSANDRA LAZIĆ<sup>1</sup> och BENGT CARLSSON<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Xylem Water Solutions, Gesällvägen 33, 174 87 Sundbyberg

<sup>2</sup> Institutionen för informationsteknologi, Uppsala Universitet, Box 337, 751 05 Uppsala

e-post: viktor.larsson@xyleminc.com



### Abstract

The objective of this study was to improve the aeration efficiency of a mid-size Swedish wastewater treatment plant in full-scale trials. The full-scale trials were performed at Sternö wastewater treatment plant, which was built in 1997 and is designed for 26,000 population equivalents. The biological treatment at Sternö wastewater treatment plant is performed in two separate treatment lines, of which one line served as a reference line with intact aeration equipment and the other one as a test line. The reference line was equipped with conventional lobe blowers, tube diffusers and simple dissolved oxygen control installed during the construction of the plant. The test line was equipped with its own aeration equipment. When evaluating the energy efficiency, the reduction of BOD and of ammonium, and the excess oxygen concentration were considered. The results show that 64% of the aeration energy can be saved when implementing an Atlas Copco ZS 45<sup>+</sup> VSD blower, Sanitaire Silver Series Low Pressure diffusers and Sanitaire Advanced Process Control system. These results are based on 29 weeks of continuous measurements. The savings in the test line correspond to 14% of the total energy consumption of the plant and the payback time for the installed aeration equipment is four years. The energy savings were performed with improved effluent quality.

*Key words* – Aeration, aeration control, energy savings, fine bubble diffusers, wastewater treatment, nitrogen removal

### Sammanfattning

Syftet med denna studie var att vid fullskalförsök energieffektivisera luftningen i ett medelstort svenskt avloppsreningsverk. Försöken genomfördes vid Sternö avloppsreningsverk, som byggdes år 1997 och är designat för 26 000 personekvivalenter. Den biologiska reningen är uppdelad på två parallella linjer. Genom att uppgradera utrustning för en av linjerna (testlinjen) och låta den andra linjen vara helt intakt (referenslinjen) kunde den faktiska energibesparingen uppmätas med båda linjerna i drift. Referenslinjen var utrustad med vridkolvsblåsmaskiner, tubdiffusorer och simpel styrreglering installerade i samband med att verket byggdes. De två luftningssystemen var helt separerade, testlinjen försågs med en egen blåsmaskin och egen rödrugning ut till linjen. Vid utvärdering av luftningseffektivitet togs hänsyn till reducerad mängd BOD och ammonium samt syreöverskott. Resultaten visar att energiförbrukningen för luftningen minskade med 64% då Atlas Copco ZS 45<sup>+</sup> VSD blåsmaskin, Sanitaire Silver Series Low Pressure luftare och Sanitaire Advanced Process Control system användes. Dessa data är baserade på mätningar under 29 veckors kontinuerlig drift. Besparingen av luftningsenergi i testlinjen motsvarade en total besparing på hela Sternö avloppsreningsverks energiförbrukning med 14%, vilket ger en återbetalningstid för den installerade utrustningen på fyra år. Energibesparingen genomfördes med förbättrad reningsgrad.

## Inledning

Den biologiska reningen är ofta en energikrävande process på avloppsreningsverk. Framför allt är det luftningen av de aeroba zonerna som kräver stora mängder energi. I genomsnitt används mer än 50 % av ett avloppsreningsverks totala energiförbrukning till luftning i den biologiska reningen (Olsson 2008; Metcalf & Eddy, 2003). Energikostnaderna har ökat för avloppsreningsbranschen, bland annat på grund av högre reningskrav och ökade energipriser (U.S. EPA, 2010). I och med att luftningen är en så pass energikrävande process finns det mycket att spara på att energieffektivisera den. Denna studie syftade till att energieffektivisera luftningen i Sternö avloppsreningsverk, med kravet att reningsgraden skulle vara oförändrad eller förbättrad.

Luftningens syfte är att förse bakterierna i den biologiska reningen med syre, som de sedan kan använda som elektronacceptor för oxidering av organiska ämnen och ammonium (nitrifikation). Beroende på bland annat temperatur och slamålder åtgår vid oxidation av 1 mg BOD<sub>5</sub> mellan 0,6 mg och 1,4 mg syre (U.S. EPA, 1989). Vid oxidation av 1 mg ammonium åtgår 4,57 mg syre (Metcalf & Eddy, 2003). Det stora syrebehovet i kombination med ett flertal andra orsaker bidrar till att luftningen kan utgöra över hälften av den totala energiförbrukningen vid ett avloppsreningsverk. För det första beror den höga energiförbrukningen på att endast ca 21 % av luften utgörs av syre, vilket gör att det krävs stora luftflöden för att syresätta avloppsvatten. För det andra är det långt ifrån all syre som tillförs som faktiskt överförs till vattnet, syreöverföringen är långt ifrån fullständig. Vidare måste blåsmaskinerna upprätthålla ett övertryck på grund av tryckförluster i ledningssystemet (utöver trycket motsvarande det statiska vattentrycket vid luftarna). Slutligen hålls slamåldern ofta hög för att uppnå god reningsgrad av kväve. För att uppnå fullständig nitrifikation krävs som lägst en luftad slamålder på 3–18 dagar beroende på temperatur och sammansättning på vattnet (Metcalf & Eddy, 2003). En ökad slamålder gör att den endogena respirationen ökar, vilket bidrar till en ökning av det totala syrebehovet (U.S. EPA, 1989).

Valet av utrustning som används i luftningen är grundläggande för att uppnå en god energieffektivitet. I denna studie togs ett helhetsgrepp på luftningen, varvid blåsmaskin, luftare och styrsystem byttes ut. Luftning kan utföras på många olika sätt och de vanligaste metoderna för luftning är mekanisk och botten täckande luftning. Vid mekanisk luftning introduceras okomprimerad luft till avloppsvattnet genom att den mekaniska luftaren skapar ett undertryck, vilket drar ned luften från ytan (till exempel med en jetluftare), eller genom att kontaktytan mellan avloppsvatten och luft på annat sätt

ökas (till exempel med en ytluftare med borstar eller rotor). Vid botten täckande luftning introduceras luften till avloppsvattnet från botten installerade luftare som förses med luft från en blåsmaskin som komprimerar luften. Botten täckande luftare kan vara utformade på olika sätt för att skapa små eller stora bubblor. Små bubblor har en större specifik yta än stora bubblor, vilket också ger högre syreöverföring. En högre syreöverföring gör att luftflödesbehovet minskar, vilket sparar energi.

I en aktivslamprocess kan syreöverföringen beskrivas med följande funktion (Lindberg, 1997):

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{Q(t)}{V} (y_{in}(t) - y(t)) + K_L a(u(t)) (y_{sat} - y(t)) - R(t) \quad (1)$$

där,

$y(t)$  = syrehalt i den luftade zonen [mg L<sup>-1</sup>]

$y_{in}(t)$  = syrehalt i inkommande flöde [mg L<sup>-1</sup>]

$y_{sat}$  = mättnadsgraden av syre [mg L<sup>-1</sup>]

$Q(t)$  = Avloppsvattenflödet [m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>]

$V$  = Tankvolymen [m<sup>3</sup>]

$K_L a(u(t))$  = Syreöverföringskoefficienten [h<sup>-1</sup>]

$u(t)$  = luftflödet till den luftade zonen [m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>]

$R(t)$  = Respirationshastigheten [mg L<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>]

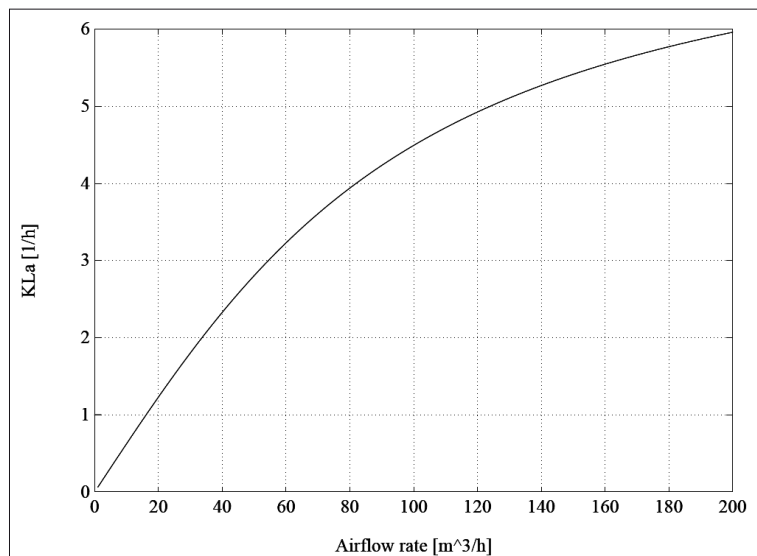
I ekvation 1 ses att syreöverföringen från luftarsystemet beskrivs av termen  $K_L a(u(t))$  multiplicerat med skillnaden mellan  $y_{sat}$  och  $y$ . Detta betyder att syreöverföringen sker effektivare ju större skillnaden är mellan  $y_{sat}$  och  $y$ , vilket sker vid låga syrehalter under förutsättning att  $y_{sat}$  är konstant (vilket är rimligt att anta). Detta förklaras av att syreöverföringen från luftbubbla till vatten sker effektivare ju större koncentrationsgradienten är.

Vidare förklarar Lindberg (1997, sidan 83 översatt) att  $K_L a$  i avloppsreningsverk beror på flertalet faktorer såsom »typ av luftare, sammansättning på avloppsvatten, temperatur, design av luftningstanken, vattendjup, placering av luftare, etc., men att det huvudsakliga *tidsvarierande* beroendet är luftflödet».

$K_L a$  har en icke-linjär relation till luftflödet (figur 1) med negativ andraderivata. Effektiviteten är som högst vid låga luftflöden och sjunker med ökande luftflöden.

Lufttillförselns reglering är generellt automatiserad därför att syrebehovet i den biologiska reningen varierar kraftigt. Ett vanligt sätt att reglera luftningssystemet är att reglera både blåsmaskin och ventiler. Blåsmaskinen regleras ofta med frekvensomformare för att upprätthålla ett konstant övertryck i luftsytet. Lufttillförseln till varje luftningszon regleras sedan med reglerventiler, vilka styrs av ställdon. Dessa får sin reglersignal från ett reglersystem som utrustas med, till exempel, syre reglering vilket syftar till att upprätthålla en konstant syrehalt i en zon eller en bassäng.

Flertalet studier om luftningsreglering har gjorts både gällande zon-individuell syre reglering och ammonium-



Figur 1.  $K_La$  som funktion av luftflöde.  
Källa: Lindberg (1997).

reglering. I vissa fall går resultaten från dessa studier emot varandra, varför platsspecifika förutsättningar kan påverka vilken reglermetod som är effektivast.

Thunberg m.fl. (2009) implementerade zon-individuell kaskadreglering i en aktivslambassäng på Käppala avloppsreningsverk och genom att jämna ut luftflödet till olika zoner ökade syreeffektiviteten med sänkta luftflödesbehov som resultat. Den tidigare luftningsregleringen var baserad på en linjär luftflödesdistribution, där två syremätare styrde luftningen. Den första syremätaren reglerade det totala luftflödet till bassängen och den andra syremätaren styrde fördelningen av luften mellan zonerna. Med den nya zon-individuella kaskadregleringen uppnåddes en luftflödesbesparing på 18 % med bevarade reningsresultat.

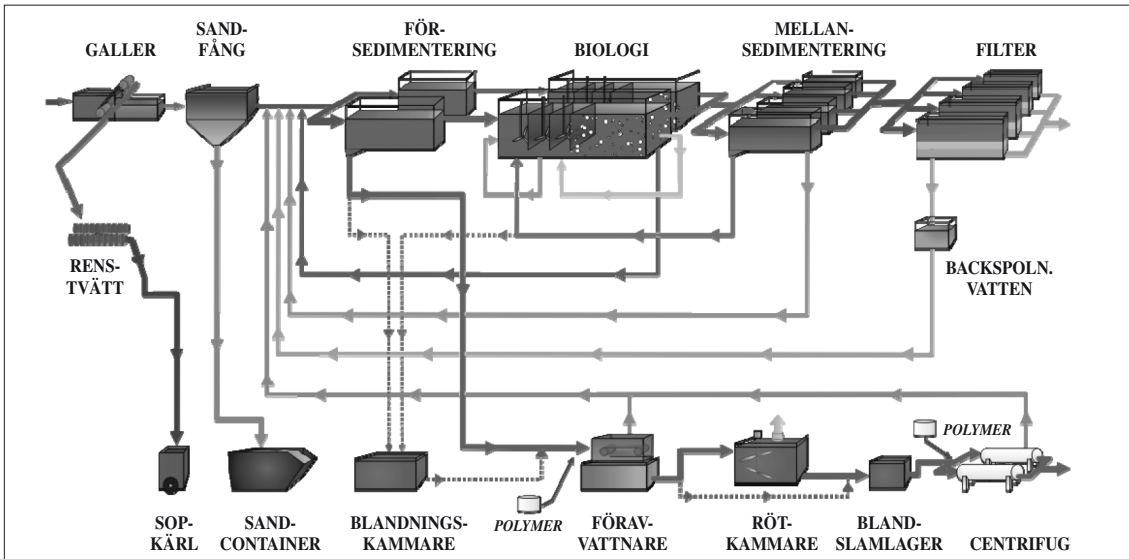
Åmand och Carlsson (2012a) kom genom simuleringar i Benchmark Simulation Model No.1 (BSM1) fram till att långsam överordnad reglering styrd av ammoniumkoncentration är ett energieffektivt sätt att styra luftningen på. Om en snabbare regulator används bör den kompletteras med begränsning på maximal syrehalt (Åmand och Carlsson, 2012b). Att hålla syrehalten konstant kan också vara en vettig strategi som i många fall ger en energiförbrukning som är relativt när den energieffektivaste lösningen.

I fullskaleförsök vid Källby avloppsreningsverk jämförde Ingildsen (2002) framkoppling med återkoppling samt kombinationer av dessa. Slutsatsen var att återkoppling på ammonium med sensorn placerad i biostaget var effektivast, med luftflödesbesparingar på 5–15 % jämfört med konstant syrerreglering.

I Olsson m.fl. (2005) diskuteras den bästa positionen för en ammoniumsensorn. Det finns för- och nackdelar med i princip alla positioner. En föreslagen placering är att placera sensorn i slutet på den luftade zonen, då det ger bra kontroll på utgående koncentration och därmed reningsresultatet. Nackdelen med detta är att det sker en (hydraulisk) fördröjning tills en störning från inkommande flöde märks. Se även Åmand m.fl. (2013) för en omfattande genomgång av metoder för att styra luftningen, samt Larsson (2011) och Lazić m.fl. (2012) för tidigare resultat av denna studie.

## Sternö avloppsreningsverk

Studien utfördes på Sternö avloppsreningsverk i Karlshamn, som togs i drift 1997 och är designat för 26 000 personekvivalenter (baserat på 70 g BOD<sub>7</sub> person<sup>-1</sup> dag<sup>-1</sup>). Den faktiska belastningen var år 2011 ca 17 000 personekvivalenter (Karlshamns kommun, 2012), varför verket är överdimensionerat för den nuvarande belastningen. Verket har förrening, primär rening, kväverening och efterpolering (figur 2). Kvävereningen är utformad efter modifierad Cape Towns universitets (UCT) process, med en anaerob zon, två anoxiska zoner (där den första tar emot returslam och den andra tar emot interncirkulation av nitratrikt vatten från slutet av de aeroba zonerna) och efterföljande aeroba zoner. Verket kan drivas med biologisk fosforreduktion. De faktiska utsläppen av BOD, total-N och total-P från verket år 2010 understiger med marginal utsläppskraven för

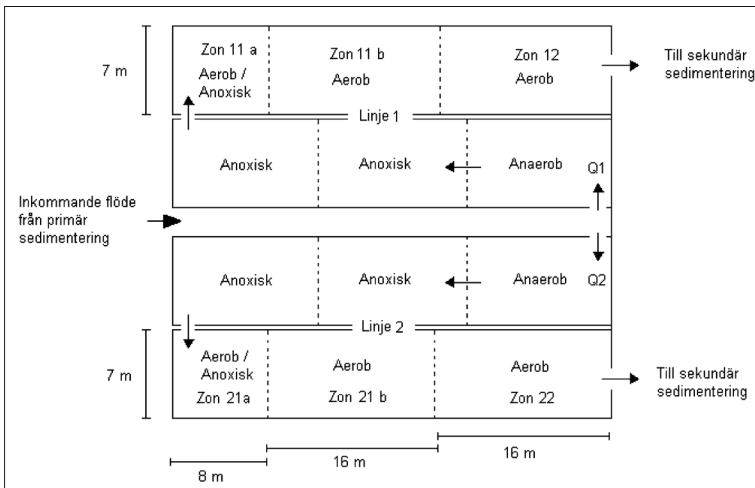


Figur 2. Sternö avloppsreningsverks processutformning. Källa: Karlshamns kommun (2011).

Tabell 1. Sternö avloppsreningsverks utsläppskrav och utsläpp 2010. Källa: Karlshamns kommun, 2011.

	BOD <sub>7</sub> mg L <sup>-1</sup>	Total N mg L <sup>-1</sup>	Total P mg L <sup>-1</sup>
Riktvärde månads-/årsmedelvärde	10 / -	- / 12	0,5 / 0,3
Utsläpp årsmedelvärde	2,8	8,9	0,07

verket (tabell 1). Verkets biologiska rening är uppdelad på två parallella reningslinjer (figur 3) med identiska bassängvolymerna. Det finns två luftade zoner per linje och den första luftade zonen i varje linje går att utöka genom en volym som är utrustad med både luftare och omrörare (zon 11a och zon 21a i figur 3). Under tiden som studiens försök pågick varierades dessa mellan omrörning och luftning (till exempel vid problem med försedimenteringen då luftbehovet ökade), men de ändrades alltid simultant i linje 1 och 2, för att få likadana förhållanden.



Figur 3. Flödesschema för den biologiska reningen.

Tabell 2. Blåsmaskiner till biologiska reningen.

Tillverkare	Effekt [kW]	Kompressionsteknologi	Frekvensstyrning	Reningslinje
HV-turbo	30	Vridkolv	Ja	Referens
HV-turbo	25/31	Vridkolv	Nej, 2-stegs	Referens
Mapner	22	Vridkolv	Nej, 1-stegs	Referens
Atlas Copco	45	Skruv	Ja	Test

Innan denna studie påbörjades var båda reningslinjerna utrustade med likadan luftningsutrustning, finblåsiga tubdiffusorer (av nu okänt märke installerade i samband med avloppsreningsverkets byggnation 1997) vars lufttillflöde reglerades genom totalt sett fyra vridspjällsventiler (två till varje linje). Fyra stycken vridkolvslåsmaskiner försåg tubdiffusorerna med luft genom ett gemensamt förgreningsrör som grenade ut sig till respektive linje och luftarna.

Luftningen reglerades genom syrereglering (figur 4), där den aktuella syrehalten direkt påverkade ventilpositionen. Regulatorn var en PI-regulator med en proportionell och en integrerande del:

$$u(t) = K \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(\tau) d\tau \right) \quad (2)$$

där,

$u$  = styrsignal

$K$  = förstärkning

$e$  = reglerfel = börvärde – utsignal

$T_i$  = Integraltid

Innan studiens start var syrebörvärdena i båda linjerna inställda på 1,7 mg/L i första zonen och 0,7 mg/L i andra zonen. Den biologiska reningens interncirkulation av nitratrikt vatten skedde från den andra luftade zonen till den anoxiska zonen, varför syrenivåerna i den andra luftade zonen hölls låga för att inte föra över för mycket syre till den anoxiska zonen.

Innan studien påbörjades stod luftningen för 47 % av verkets totala energiförbrukning. Under perioden 7 sep-

tember 2011 – 4 april 2021 var slamåldern i genomsnitt 9,5 dagar i referenslinjen (varierade mellan 7,7 och 12,3 dagar) och 9,6 dagar i testlinjen (varierade mellan 7,3 och 11,1 dagar). Avloppsvattentemperaturen var under samma period i genomsnitt 11,8 °C (varierade mellan 7,8 °C och 17,8 °C).

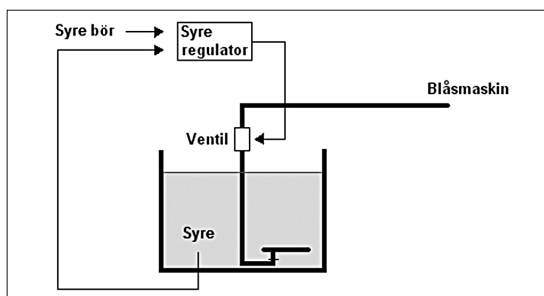
## Metod

### Uppgradering av luftningsutrustningen i testlinjen

I mars 2011 gick en av de fyra befintliga blåsmaskinerna sönder och denna byttes ut mot en ny skruvblåsmaskin (Atlas Copco ZS 45<sup>+</sup> VSD) och i samband med detta drogs ett nytt rör från denna maskin, parallellt med det gemensamma förgreningsröret. Dessutom installerades en ventil som möjliggjorde total separation av luften mellan testlinjen och referenslinjen, vilket gjorde att de två linjernas luft kom från helt separata källor. De fyra vridspjällsventilerna som reglerade luftflödet till varje zon behölls dock som de var. Separation av luftkällorna till de båda linjerna möjliggjorde, i kombination med mätning av energiförbrukningen av varje blåsmaskin, att energiförbrukningen för luftningen till varje linje kunde mätas. Totalt sett var i detta läge fyra blåsmaskiner aktiva, varav en försedde testlinjen och de övriga tre försedde referenslinjen (tabell 2). Av de tre blåsmaskinerna som försedde referenslinjen användes endast två och den tredje var i beredskap.

Under maj–juni 2011 byttes samtliga luftare i testlinjen ut mot nya luftare av modell Sanitaire Silver Series Low Pressure. 440 st luftare installerades med en botten-täckning av ca 6 % (tabell 3). De nya luftarna är av finblåsigt typ med gummimembran samt försedda med en liten mynning mellan rör och luftare för att säkerställa jämn luftflödesdistribution till samtliga luftare. För att säkerställa god omrörning i biosteget sattes en minimigräns på det tillåtna luftflödet till 1 Nm<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>.

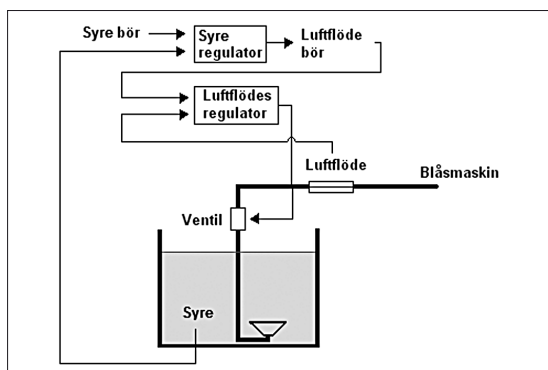
I september 2011 aktiverades Sanitaire Advanced Process Control (APC) processtyrningssystem, vilket är en mjukvara för effektiv processtyrning av den biologiska reningen. Syftet med processtyrningssystemet är att maximera energieffektiviteten och upprätthålla syrenivåerna i de luftade bassängerna samtidigt som god reningsgrad upp-



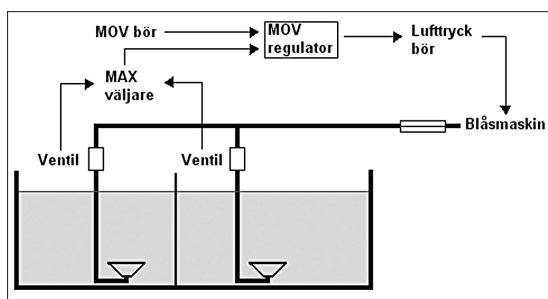
Figur 4. Syrereglering i referenslinjen.

Tabell 3. Bottentäckning i testlinjen.

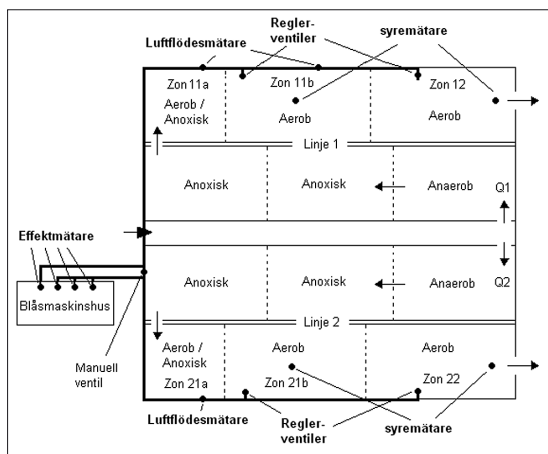
Zon	Antal luftare	Total diffusorarea (Ad) [m <sup>2</sup> ]	Tankarea (At) [m <sup>2</sup> ]	Bottentäckning (Ad/At) [%]
11a	90	3,42	56	6,1
11b	175	6,65	112	5,9
12	175	6,65	112	5,9



Figur 5. Kaskadreglering i testlinjen (Sanitaire APC system).



Figur 6. MOV-logik i testlinjen (Sanitaire APC system).



Figur 7. On-line mätningar i den biologiska reningen.

rätthålls. I mjukvaran finns bl a kaskadreglering (figur 5, se även Olsson, 2008) och Most Open Valve-logik (MOV-logik, figur 6, se även Carlsson och Hallin, 2010). Kaskadregleringen upprätthåller syrenivåerna i bassängen genom två PI-regulatorer som är seriekopplade. Detta möjliggör en snabbare och stabilare reglering än om bara syrerreglering används, då vridspjällsventilernas olinjära karaktäristik motverkas. Vidare kan eventuella störningar på grund av tryckvariation korrigeras för snabbare än om vanlig syrerreglering används. MOV-logiken ställdes in på att hålla ventilerna mellan 75 och 95% öppna, med syfte att minimera tryckförlusterna över ventilerna. Sanitaire APC genomförde detta genom att välja ett av tre stycken förinställda tryckbörvärden hos blåsmaskinen, så att den önskade ventilöppningsgraden uppnådes. På så sätt anpassas blåsmaskinstrycket efter processens syrebehov, vilket ger låga tryckförluster samtidigt som det säkerställs att processen kan förses med tillräckligt stort luftflöde vid en eventuell belastningsökning. Sanitaire APC är dessutom utrustat med en rengöringsfunktion för att motverka biologisk påbyggnad på luftarmembranen. Denna sträcker ut membranen genom att en gång per vecka under fem minuter maximera luftflödet, vilket bryter eventuell påbyggd biofilm. Rengöringsfunktionen minskar tryckförlusterna över membranen, som annars skulle öka med eventuell ökad mängd biofilm.

I samband med installation av Sanitaire APC system ändrades även syreprofilen i testlinjen till 0,7 mg/L i zon 1 och 1,0 mg/L i zon 2. Syftet med detta var att spara belastning (av organiskt material och ammonium) från zon 1 till zon 2 i syfte att minska de syretoppar som ofta uppkom i zon 2.

## Mätningar

De flesta mätningarna gjordes on-line eller genom veckoprov (tabell 4) på olika positioner i verket (figur 7). I Sternö avloppsreningsverk utgörs vattenflödet till den biologiska reningen av flera olika delströmmar, där verkets inkommande flöde och internbelastning (till exempel spolvatten från backspolning av sandfiltren) ingår. Flödesuppdelningen till testlinjen och referenslinjen styrs av en metallplåt som sitter i kanalen innan uppdelningen mellan de två linjerna. I juni 2011 gjordes en mätning av flödesandelen mellan testlinjen och referens-

Tabell 4. *Mätningar.*

Mätning	Enhet	Mätfrekvens	Mätposition
Totalflöde till biologisk rening	m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>	On-line	Flera (som summeras)
Flödesfraktion till test-/ref.linjen	%	Ett tillfälle	Före inlopp till test-/ref.linjen
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	mg L <sup>-1</sup>	Veckoprov	Inlopp till test-/ref.linjen
BOD <sub>7</sub>	mg L <sup>-1</sup>	Veckoprov	Inlopp till test-/ref.linjen
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	mg L <sup>-1</sup>	Veckoprov	Utlopp från test-/ref.linjen
BOD <sub>7</sub>	mg L <sup>-1</sup>	Veckoprov	Utlopp från test-/ref.linjen
Syrehalt	mg L <sup>-1</sup>	On-line	Zon 11b, 12, 21b, 22
Temperatur	°C	On-line	Zon 11b, 12, 21b, 22
Energiförbrukning	kWh	On-line	Blåsmaskin 1, 2, 3, 4
Luftflöde	Nm <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>	On-line	Zon 11, 12 och (21+22)
Ventilöppningsgrad	%	On-line	Zon 11, 12, 21, 22

linjen med hjälp av två akustiska flyglar av modellen Vectrino från Nortek, vilka mäter vattnets hastighet. En mätare användes för att mäta flödet uppströms metallplåten (för att få totalflödet), varefter mätningar i tolv positioner (i tre horisontella och fyra vertikala led) gjordes på var sida om metallplåten. Flödesfraktionen beräknades till 53 % till referenslinjen och 47 % till testlinjen (Wessman, 2011).

Veckoanalyser på ingående (till biosteget) och utgående (från eftersedimenteringen) BOD<sub>7</sub> och NH<sub>4</sub><sup>+</sup> till både test- och referenslinjen gjordes av Sternölaboratoriet, vilket är ett ackrediterat laboratorium vid Sternö avloppsreningsverk. Proven togs av en automatisk provtagare på flödesproportionell basis. Dessa prov förvarades i provtagaren och tömdes dagligen, varefter proven frystes direkt. Samtliga dygnsprover från en mätvecka tinades och sammanblandades för att analyseras tillsammans.

Syrehalt och vattentemperatur mättes med den optiska syremätaren WTW FDO 700 IQ. Luftflödet mättes med ABB Sensyflow FMT 400-VTS, vilken är en termisk massflödesmätare. Både syre- och luftflödesmätarna var nyinstallerade till studien till både test- och referenslinjen.

#### Utvärderingsperioder

Utvärdering av energieffektivitet och reningsresultat gjordes på veckobasis. Dessa veckoresultat låg sedan till grund för utvärdering av blåsmaskin, luftare och styr-

system. Utvärderingen av den installerade utrustningen gjordes därför i tre perioder (tabell 5), eftersom uppgraderingar skedde vid tre tillfällen. På så sätt har förbättringen från varje enskild luftningsprodukt kunnat utvärderas. Det är ett tidsmässigt glapp mellan slutet på period 1 (20 april 2011) och starten på period 2 (6 juli 2011), vilket beror på att bytet av luftare i testlinjen samordnades med en reparation av väggarna mellan zonerna i bassängen.

#### Metoder för utvärdering

Syreöverföringen som skett under varje mätvecka beräknades enligt modifierad ASCE (1997):

$$OTR = [X \times BOD_{5,r} + Y \times NH_{4,r}] \times \frac{\beta C_{\infty}^*}{\beta C_{\infty}^* - C} + QC \quad (3)$$

där,

$OTR$  = syreöverföring [kg dag<sup>-1</sup>]

$X$  = oxidationskoefficient för BOD<sub>5</sub> = 1,1 (U.S. EPA, 1989) [-]

$BOD_{5,r}$  = reducerad mängd BOD<sub>5</sub> [kg dag<sup>-1</sup>]

$Y$  = oxidationskoefficient för NH<sub>4</sub><sup>+</sup> = 4,57 (Metcalf & Eddy, 2003) [-]

$NH_{4,r}$  = reducerad mängd NH<sub>4</sub><sup>+</sup> [kg dag<sup>-1</sup>]

$\beta$  = kvot mellan C<sub>∞</sub><sup>\*</sup> i processvatten och C<sub>∞</sub><sup>\*</sup> i renvatten = 0,95 (ASCE, 1997) [-]

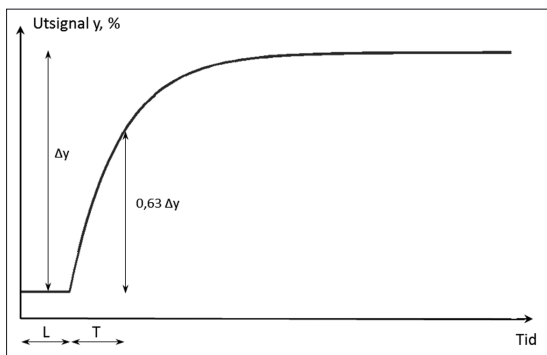
$C_{\infty}^*$  = mättnadssyrevärde [kg m<sup>-3</sup>]

$C$  = syrehalt [kg m<sup>-3</sup>]

$Q$  = avloppsvattenflöde [m<sup>3</sup> dag<sup>-1</sup>]

Tabell 5. *Utvärderingsperioder.*

Utvärderingsperiod (antal mätveckor)	Tidsperiod	Ny luftningsutrustning
P1 (2)	6 – 20 april 2011	Atlas Copco ZS 45+ VSD blåsmaskin
P2 (8)	6 juli – 7 sept. 2011	Sanitaire Silver Series Low Pressure luftare
P3 (29)	7 sept. 2011 – 4 april 2012	Sanitaire APC system med MOV-logik, ny syreprofil



Figur 8. Exempel på ett stegsvarstest.

BOD<sub>5</sub> uppskattades utifrån BOD<sub>7</sub> enligt Norrström (1976):

$$BOD_5 = \frac{BOD_7}{1.15} \quad (4)$$

Energieffektiviteten beräknades enligt ASCE (1997):

$$AE = \frac{OTR}{P} \quad (5)$$

där,

$AE$  = luftningens energieffektivitet [kg kWh<sup>-1</sup>]

$OTR$  = syreöverföring [kg dag<sup>-1</sup>]

$P$  = energiförbrukning [kWh dag<sup>-1</sup>]

Energibesparingen i procent räknades ut med:

$$E_{red} = 100 \times \left( 1 - \frac{AE_{ref}}{AE_{test}} \right) \quad (6)$$

där,

$E_{red}$  = energibesparing till följd av förbättrad luftning [%]

$AE_{ref}$  = luftningens energieffektivitet i referenslinjen [kg kWh<sup>-1</sup>]

$AE_{test}$  = luftningens energieffektivitet i testlinjen [kg kWh<sup>-1</sup>]

Vid beräkning av återbetalningstid av den installerade utrustningen användes Sternö avlopprensningens genomsnittliga energikostnad under perioden 1 januari 2011 – 31 december 2011 som underlag (1,132 SEK/kWh), för att innefatta energiprisets variationer över året.

## Reglering

Regulatorerna i kaskadregleringen (luftflödes- och syre-regulatorerna) trimmades på plats i Sternö avlopprensningens verk under början av period 3 med hjälp av lambdametoden, beskrivet i Carlsson och Hallin (2010). Metoden är en tumregelsmetod och går ut på att göra ett stegsvarstest (vilket är en kontrollerad förändring av styrsignalen) och utifrån förändring i utsignalen beräkna lämpliga regulatorparametrar. Från stegsvarstester beräknades processens förstärkning enligt:

$$K_S = \frac{\Delta y}{\Delta u} \quad (7)$$

där,

$\Delta y$  = skillnad i utsignal, t.ex. syrehalt

$\Delta u$  = skillnad i styrsignal, t.ex. luftflöde

Utöver  $K_S$  beräknas även dödttid  $L$  (tid det tar från styrsignalens förändring till dess att utsignalen börjar förändras) samt 63 % stigtid  $T$  (tid det tar för utsignalen att nå 63 % av slutvärdet), se figur 8.

Parametern  $\lambda$  används i regulatorinställningen (9) och beräknas enligt:

$$\lambda = p \times T \quad (8)$$

där,

$p$  är ett användarval där  $p < 1$  ger snabb men känslig reglering och  $p > 3$  ger långsam och stabil reglering. Oftast väljer man  $p$  till ett värde mellan 1 och 3 och i denna studie valdes  $p$  för luftflödesregulatorerna till 1 och  $p$  för syreregulatorerna till 2,5 i zon 1 och 2,0 i zon 2.  $p$  i zon 2 valdes lägre än i zon 1 på grund av att ställdonet till zon 2 upplevdes långsammare än det till zon 1.

$T$  = 63 % stigtid

PI-regulatorns inställningsparametrar  $K$  och  $T_i$  beräknas med:

$$K = \frac{T}{K_S(\lambda + L)} \quad (9)$$

$$T_i = T \quad (10)$$

För varje regulator gjordes minst tre stegsvarstest från vilka ett medelvärde bildades och implementerades (tabell 6).

Tabell 6. Implementerade reglerparametrar.

Parameter	Zon 1		Zon 2	
	Luftflödesregulator	Syreregulator	Luftflödesregulator	Syreregulator
K	0,45	0,57	0,50	0,62
T <sub>i</sub> [s]	17	335	13	270



Tabell 7. Inkommande och utgående BOD<sub>7</sub> och NH<sub>4</sub><sup>+</sup> till linjerna.

Period	Inkommande BOD <sub>7</sub> [mg/L]		Utgående BOD <sub>7</sub> [mg/L]		Inkommande NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> [mg/L]		Utgående NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> [mg/L]		
	Linje	Test	Referens	Test	Referens	Test	Referens	Test	Referens
P1		115,0	155,0	4,5	4,7	20,0	16,5	5,9	2,3
P2		119,9	119,6	3,4	3,4	12,5	12,7	0,1	0,1
P3		89,1	93,4	4,0	4,6	12,8	13,1	2,2	3,1

Tabell 8. Energieffektivitet-luftning (AE), luftflödes- och energibesparing för perioderna.

Period	AE [kg O <sub>2</sub> /kWh]		Luftflödesbesparing [%]	Energibesparing [%]	Energibesparing [kWh/vecka]
	Testlinjen	Referenslinjen			
P1	2,0	1,3		34	1565
P2	1,8	0,8	21	57	4840
P3	2,8	1,0	29	64	3376

## Resultat och diskussion

### Reningsresultat

Vid implementering av en ny reglerstrategi är det viktigt att implementeringen sker med oförändrad eller förbättrad reningsgrad. I denna studie fick därför inte energibesparingen ske på bekostnad av ökade utsläpp. Under period 3, vilket är den period då Sanitaire APC system var installerat, var utsläppen av BOD<sub>7</sub> och NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (tabell 7) lägre i testlinjen än i referenslinjen. Reduktionen av BOD<sub>7</sub> och NH<sub>4</sub><sup>+</sup> var 96 % respektive 83 % i testlinjen, att jämföra med 95 % respektive 76 % i referenslinjen. Detta betyder att kravet att reningsgraden skulle vara oförändrad eller förbättrad har uppfyllts. Utsläppen var tillfredsställande i relation till utsläppskraven.

### Energibesparing

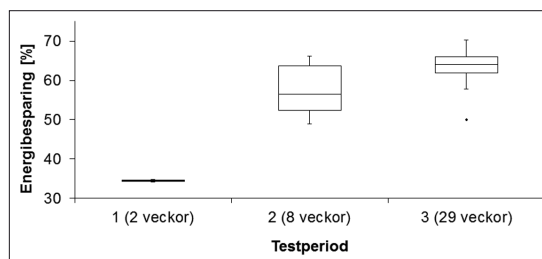
Den totala energibesparingen under testperioderna redovisas genom en boxplot (figur 9). I boxploten inkluderar »spridningspinnarna» (eng. *whiskers*) datapunkter inom 1,5 kvartilavstånd från övre och undre kvartil. Det finns en uteliggare (i period 3), vilket inträffar på grund av tillfälligt låg AE i testlinjen och tillfälligt hög AE i referenslinjen. Från figuren kan utläsas att energibesparingen var ojämn under period 2, vilket möjligen har orsakats av de ovan nämnda problemen i försedimenteringen under perioden. Under de åtta veckorna i period 2 varierade energibesparingen mellan 49 och 66 %, vilket motsvarar drygt 4800 kWh per vecka beroende på att det var problem i försedimenteringen under denna period som ökade belastningen på biosteget och därmed

syrebehovet. Under period 3 varierade energibesparingen mellan 62 och 70 % (exklusive uteliggaren på 50 %), med ett medianvärde på 64 % och ett medelvärde på 64 %. Detta motsvarar knappt 3400 kWh per vecka, vilket uppmätts under veckor med normalt fungerande försedimentering.

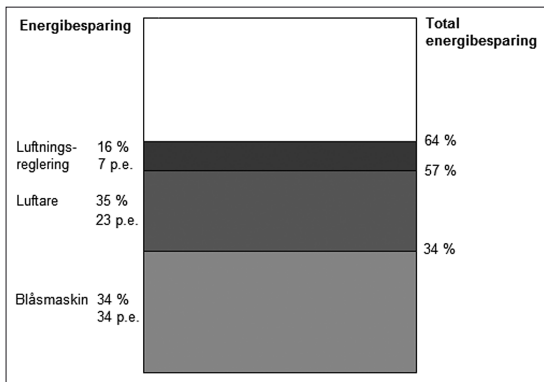
En mycket viktig fråga i detta sammanhang är varifrån energibesparingarna kommer. Det kan konstateras att utrustningen implementerades i tre olika steg, vilka vart och ett påverkade energiförbrukningen i positiv riktning. Låt oss därför i detalj studera hur energiförbrukningen gradvis påverkades vid de olika implementeringarna.

I *period 1* installerades en ny blåsmaskin, vilket gjorde att energibesparingen under perioden blev 34 % (tabell 8). Denna energibesparing kommer uteslutande från effektivare komprimering av luften.

I *period 2* installerades nya luftare, vilket gjorde att energibesparingen ökade från 34 % till 57 %. Således bi-

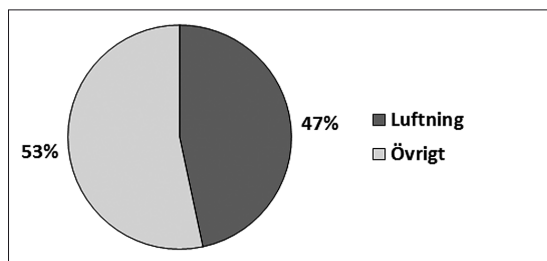


Figur 9. Energieffektivitet i testlinjen jämfört med referenslinjen.



Figur 10. Energibesparing i testlinjen efter varje uppgradering jämfört med referenslinjen. I figuren betyder p.e. procentenheter.

drog luftarna med 23 procentenheter. Energibesparingen ökade dock  $100 \times \frac{23}{100 - 34} \% = 35\%$ . Detta betyder att om luftarna, hypotetiskt sett, installerats utan att den nya blåsmaskinen installerats först, skulle en energibesparing på 35 % ha uppnåtts. Detta har sin orsak i att det är lättast att spara energi i ett energiineffektivt system. Ju fler åtgärder som redan vidtagits, desto svårare blir det att spara ytterligare energi. Den ökade energibesparingen under denna period har sin grund i att de nya luftarna skapar mindre bubblor som har en effektivare syreöverföring, vilket leder till att det behövs mindre luftflöde för att syresätta vattnet (16 % högre syreöverföringseffektivitet, OTE). Under utvärderingsperioden var luftflödesbesparingen 21 %. Det kan tilläggas att tryckfallet över de nya luftarna var lågt, vilket beror på att Sanitaire Silver Series Low Pressure luftare utvecklats just för lågt tryckfall och ett stort luftflödesområde. Det sänkta tryckfallet över membranen och det sänkta luftflödesbehovet möjliggjorde en sänkning av arbetstrycket för blåsmaskinen från 0,70 bar till 0,60 bar (att jämföra med konstant trycknivå på 0,70 bar i referenslinjen).

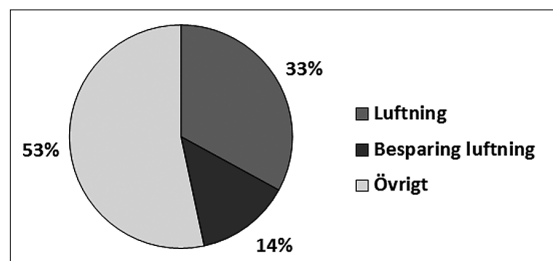


Figur 11. Luftningens andel av den totala energiförbrukningen före uppgradering.

I period 3 installerades ny luftningsreglering samt en ny syreprofil, vilket gjorde att energibesparingen ökade ytterligare, från 57 % till 64 %. Således bidrog luftningsregleringen tillsammans med den nya syreprofilen med 7 procentenheter. Energibesparingen ökade dock på motsvarande sätt som ovan 16 %. Energibesparingen utgjordes under denna period av flera delar, varav MOV-logiken bör omnämnas särskilt. MOV-logiken syftar till att hålla luftventilerna så öppna som möjligt. Öppna luftventiler leder i allmänhet till låga tryckförluster, vilket gjorde att blåsmaskinen under försöken kunde arbeta mot ett lägre arbetstryck (0,57 bar i medeltal jämfört med tidigare 0,60 bar). Även kaskadregleringens energibesparande effekt bör omnämnas. Kaskadregleringen ger snabbare och stabilare reglering då vridspjällventilernas olinjära karakteristik motverkas, vilket gör att vissa syretoppar som kan uppkomma med vanlig syre reglering förhindras. Ett förhindrande av syretoppar ger sparad energi i och med lägre luftflöden samt det faktum att syreöverföringen sker mer effektivt vid låga syrekoncentrationer än vid höga. Under utvärderingsperioden var luftflödesbesparingen 29 %. Energibesparingarna från blåsmaskin, luftare och luftningsreglering summeras i figur 10.

## Ekonomisk analys

Luftningen stod innan testlinjens uppgradering för 47 % av verkets totala energiförbrukning (figur 11). I och med de installationer som genomfördes till och med period 3 sparades 64 % av luftningsenergin i testlinjen, vilket motsvarar en besparing av 14 % av verkets totala energiförbrukning (figur 12). Den sänkta energiförbrukningen som uppnåddes vid testerna motsvarar en årlig besparing av verkets energikostnader med ca 200 000 SEK. En sådan besparing ger en återbetalningstid på all utrustning på totalt sett fyra år. Av de olika installationerna hade luftarna (Sanitaire Silver Series Low Pressure) kortast återbetalningstid med 1,5 år.



Figur 12. Energibesparing till följd av uppgradering med ny blåsmaskin, luftare och luftningsreglering till testlinjen (P3) i relation till hela verkets förbrukning före uppgradering.

## Slutsatser

Genom att ta ett helhetsgrepp på luftningen i den biologiska reningen kan stora mängder energi sparas, speciellt för verk med gammal utrustning. Under denna studie har luftningen uppraderats och energieffektiviserats med förbättrad reningsgrad, avskiljningen av BOD<sub>7</sub> och NH<sub>4</sub><sup>+</sup> var 96 % respektive 83 % i testlinjen. Den totala energibesparingen uppgick under 29 veckors mätningar till 64 %.

Återbetalningstiden på all installerad utrustning är fyra år. Av den installerade utrustningen sparade Atlas Copco blåsmaskin 34 procentenheter genom en effektivare komprimering av luften. Därefter ökade Sanitaire luftare besparingen med 23 procentenheter, vilket beror på sänkt tryckfall över membranen och sänkt luftflödesbehov på grund av effektivare syreöverföring. Sanitaire APC ökade energibesparingen med ytterligare 7 procentenheter, vilket beror på ytterligare sänkt lufttryck tack vare MOV-logik samt en effektivare reglering i och med kaskadreglering.

## Tack

Författarna vill tacka Ida Schyberg, Per Karlsson och Stefan Lennartsson på Sternö avloppsreningsverk för gott samarbete under studien. Författarna vill också rikta ett tack till Leif Sedin, Thore Månsson, Silvano Insalaco och Patrik Almlöf på Xylem Water Solutions. Finansiellt stöd för Bengt Carlssons forskning har getts av Svenskt Vatten (kontraksnummer 29-116) och Formasprojektet DANENA (kontraksnummer 211-2010-141).

## Referenser

ASCE (1997) Standard Guidelines for In-Process Oxygen Transfer Testing. ASCE 18-96, ISBN 9780784401149.

Carlsson, B., Hallin, S. (2010) Tillämpad regler teknik och mikrobiologi I kommunala reningsverk. Svenskt Vatten, Publikation U10.

Ingildsen, P., Jeppsson, U., Olsson, G. (2002) Dissolved oxygen controller based on on-line measurements of ammonium combining feed-forward and feedback, *Water Science and Technology* 45(4-5), 453-460.

Karlshamns kommun (2011). Miljörapport Sternö AVR 2010. Hämtad via <http://dev.karlshamn.se/PageFiles/3080/Milj%C3%B6rapport%202010%20Stern%C3%B6.pdf> 2013-01-02.

Karlshamns kommun (2012). Miljörapport Sternö AVR 2011. Hämtad via <http://dev.karlshamn.se/PageFiles/3080/Stern%C3%B6%20ARV,%20milj%C3%B6rapport%202011.pdf> 2013-01-23.

Larsson, V. (2011) Energy savings with a new aeration and control system in a mid-size Swedish wastewater treatment plant, Examensarbete Miljö- och Vattenteknik – UPTEC W11 034, Institutionen för informationsteknologi, Uppsala Universitet.

Lazić, A., Larsson, V., Nordenborg, Å. (2012) Energy savings potential of new aeration system: Full scale trials, *Water Practice and Technology* 7(4).

Lindberg, C-F. (1997) Control and estimation strategies applied to the activated sludge process, doktorsavhandling, avdelningen för materialvetenskap, Uppsala Universitet.

Metcalfe & Eddy (2003) *Wastewater Engineering: treatment and reuse*, 4<sup>th</sup> ed., McGraw-Hill, New York.

Norrström, H. (1976) Chemical pulping, *Pure and Applied Chemistry*, 45, 181-186.

Olsson, G., Nielsen, M. K., Yuan, Z., Lynggaard-Jensen, A., Steyer, J.-P. (2005) Instrumentation, control and automation in wastewater systems, IWA, Scientific and Technical Report No. 15.

Olsson, G. (2008) Effektivare reningsverk, Några steg mot bättre energi- och resursutnyttjande, Svenskt Vatten Utveckling, Rapport Nr 2008-19.

Thunberg, A., Sundin, A-M., Carlsson, B. (2009) Energy optimization of the aeration process at Käppala wastewater treatment plant, 10<sup>th</sup> IWA Conference on Instrumentation, Control & Automation, Cairns, Australia, 14-17 juni.

U.S. EPA (1989) Design Manual – Fine Pore Aeration Systems, EPA/625/1-89/023.

U.S. EPA (1999) Wastewater Technology Fact Sheet – Fine Bubble Aeration, EPA 832-F-99-065.

U.S. EPA (2010) Evaluation of Energy Conservation Measures – for Wastewater Treatment Facilities, EPA 832-R-10-005.

Wessman, M. (2011) Distribution of flow between basins 1 and 2 Sternö ARV, Karlshamn, Internal report, Xylem Inc.

Åmand, L., Carlsson, B. (2012a) Optimal aeration control in a nitrifying activated sludge process, *Water Research* 46(7), 2101-2110.

Åmand, L., Carlsson, B. (2012b) Energy efficient ammonium feedback control, New Developments in IT & Water, Amsterdam, The Netherlands, 4-6 november.

Åmand, L., Carlsson, B., Olsson G. (2013) Aeration control – a review. Accepterad för *Water, Science and Technology*.