



UPPSALA
UNIVERSITET

UPTEC W 16002

Examensarbete 30 hp
Januari 2016

Möjlighet till energieffektivisering och förbättrad övervakning av luftningssteget vid implementering av en Alphameter i Himmerfjärdsverket

Jens Kluge

Referat

Möjlighet till energieffektivisering och förbättrad övervakning av luftningssteget vid implementering av en Alphameter i Himmerfjärdsverket

Jens Kluge

På Syvabs reningsverk i Himmerfjärden används cirka 18 % av den totala energiförbrukningen i luftningsbassängerna. Genom att minska mängden luft som tillsätts till luftningsbassängerna med bibehållen reningsgrad kan en energibesparing erhållas. Syvab har också haft problem med försämrad kväverening på grund av toxiskt inkommande material till reningsverket, vilket har påverkat aktivslamprocessen i luftningsbassängen negativt. Hösten 2013 slogs deras aktivslamprocess ut på grund av toxiskt inkommande material från en industri i upptagningsområdet.

Syftet med denna rapport var att undersöka om Alphametern, som är en så kallad off-gas analysutrustning, kan bidra till minskad energianvändning och förbättrad övervakning av aktivslamprocessen. Alphametern installerades i en luftningsbassäng i en av åtta linjer på Himmerfjärdsverket. Undersökningen visar att Alphametern inte kan ge en tidigare signal vid störning i kväveprocessen i jämförelse med den ordinarie mätningen. Alphametern kan dock ge ytterligare information vid en störning genom syreupptagningshastigheten (OUR-värdet). Eftersom ingen tidigare signal kan ges av Alphametern ges ingen ökad möjlighet att tidigare sätta in driftåtgärder för att minska eventuell skada på kvävereningen. En fördel med Alphametern är att den kan användas för att skapa en energieffektiv syrehaltsprofil över luftningsbassängen med hjälp av OUR-värdet förutsatt att zonvis reglering av luftflödet är möjlig. På Syvab fanns inte möjlighet till zonvis reglering och därför kunde inte möjlighet att skapa en energieffektiv syrehaltsprofil testas. Alphameters reglering av luftflödet jämfördes också med den ordinarie regleringen i en annan linje. De båda testlinjerna jämfördes också vid ordinarie reglering för att se om det fanns skillnader mellan linjerna som inte berodde på vilken typ av reglering som användes. Resultatet visade att Alphametern inte kunde påvisa en mer energieffektiv reglering av luftflödet i jämförelse med ordinarie reglering givet de reglerinställningar som användes under utvärderingsperioden. Eftersom utvärderingen endast varade under en vecka går det inte att dra några slutsatser för hur Alphametern skulle prestera under en längre period, till exempel ett år. För en komplett utvärdering av Alphameters förbättringsmöjligheter behöver den installeras i en linje med zonvis reglering av luftflödet.

Nyckelord: Avloppsrening, Alphameter, Luftningsbassäng, Aktivslamprocess, Nitrifikation

*Institutionen för informationsteknologi, Uppsala universitet
Box 337, SE-751 05 Uppsala, ISSN 1401-5765*

Abstract

The possibilities for improved energy efficiency and improved monitoring of the aeration step with the implementation of an Alphameter in Himmerfjärdsverket

Jens Kluge

At the wastewater treatment plant in Himmerfjärden approximately 18 % of the total energy consumption is used for the aeration basins. By reducing the amount of air that is added to the aeration basins, while maintaining the degree of purification, the energy consumption can be lowered. There have also been some problems at Syvab with the nitrogen removal due to toxic materials coming in to the plant. In the autumn of 2013 the active sludge process were damaged when toxic material entered the plant.

The aim was to investigate whether the Alphameter, a so called off-gas analysis equipment, can contribute to reducing the energy consumption and improve the monitoring of the activated sludge process. The Alphameter was installed in an aeration basin in one of eight lines at the Himmerfjärdsverket WWTP. The result showed that the Alphameter could not give an earlier signal for disturbance in the activated sludge process in comparison with the ordinary measurements. The Alphameter can give more information on the disturbance through the OUR-value. Because no earlier signal can be provided by the Alphameter there is no possibility to make early operation changes to reduce the possible damage to the activated sludge process. An advantage of the Alphameter is that it can be used to create an energy efficient oxygen profile of the aeration basin through the OUR-value, given the possibility of zone regulation of the air. At Syvab they did not have zonal regulation and therefore an energy efficient oxygen profile could not be tested. The basin with Alphameter regulation was compared with a basin where ordinary control was used. A comparison was also made between the two test lines when they both used the regular control to see if there were any differences between the lines that did not depend on the type of regulation used. The results showed that the Alphameter could not give a more energy efficient control of the airflow in comparison to the regular control given the control settings used during the evaluation period. Since the evaluation only lasted for a week, it is difficult to draw any conclusions on how the Alphameter would perform over a longer period of time. For a complete evaluation of the Alphameter it needs a basin with zonewise regulation of the airflow.

Keywords: Wastewater treatment plant, Alphameter, Aeration basin, Active sludge process, Nitrification

*Department of Information Technology, Uppsala University
Box 337, SE-751 05 Uppsala, ISSN 1401-5765*

Förord

Detta examensarbete inom Civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik vid Uppsala universitet är den sista delen i min utbildning. Examensarbetet har varit ett samarbete mellan Syvab AB och Ramböll Stockholm. Handledare på Syvab har varit Kristina Stark Fujii och handledare på Ramböll har varit Hanna Särnefält. Ämnesgranskare har varit Bengt Carlsson vid institutionen för informationsteknik vid Uppsala universitet och examinator har varit Fritjof Fagerlund vid institutionen för geovetenskaper vid Uppsala universitet.

Jag vill verkligen tacka alla på Syvab för att ni har tagit er tid att hjälpa mig med både stort och smått. Speciellt tack vill jag rikta till Kenneth Öhman som har hjälpt mig otroligt mycket med datainsamling och programmeringen av regleringen samt Pontus Lindström på Huddinge Elteknik som har hjälpt till att integrera Alphametern i det befintliga styrsystemet. Ett stort tack vill jag också rikta till Kristina Stark Fujii, som tog initiativet till att hyra Alphametern. Jag vill också tacka Hanna Särnefält på Ramböll som har gett mig goda råd under rapportskrivandet. Det har varit ett mycket lärorikt examensarbete där jag har fått en ökad förståelse för många olika delar i reningsverket.

Jens Kluge

Uppsala, januari 2016

Populärvetenskaplig sammanfattning

Reningsverkets uppgift är att rena det inkommande avloppsvattnet innan det släpps ut i naturen till närmaste vatten i form av sjö eller vattendrag. På ett reningsverk finns normalt en mekanisk, biologisk och kemisk rening. Denna rapport berör endast den biologiska delen där organiskt material och kväve renas genom bakterier och tillförsel av luft i en så kallad luftningsbassäng. På Himmerfjärdsverket står denna luftning för cirka 18 % av hela verkets energiförbrukning, vilket är det största enskilda energibehovet på verket.

Himmerfjärdsverket har tidigare haft problem med försämrad kväverening i deras luftningsbassäng på grund av negativ påverkan från toxiska ämnen i inkommande avloppsvatten. Syftet med rapporten var därför att undersöka om en Alphameter kan minska energianvändningen och förbättra övervakningen av luftningsbassängen samt undersöka för- och nackdelar med Alphameter. Alphameter är en analysutrustning som kan användas för att dels styra luftflödet i en luftningsbassäng samt återge viktiga parametrar som talar om hur processen fungerar i bassängen.

Lufttillflöden styrs av en så kallad regulator som justerar en ventil i ledningen till luftningsbassängen. Genom att öppna ventilen tillsätts mer luft och vice versa. I luftningsbassängen löser sig en del av syret i vattnet och där kan mikroorganismer, främst bakterier, använda sig av syret för att bland annat bryta ner kvävet som finns i det inkommande avloppsvattnet. För att det ska finnas tillräckligt med syre i vattnet väljs ett bestämt värde på mängden löst syre som vill uppnås i vattnet. Det värdet matas in i regulatorn och därmed justerar regulatorn ventilen för att försöka uppnå den specifika syrehalten som efterfrågas. Syrehalten i vattnet mäts med en speciell givare. Vid en för hög syrehalt minskar ventilen sin öppning och vid för låg syrehalt ökar ventilen sin öppning. Eftersom avloppsvattnet förändras under dygnet krävs olika mängder luft under olika tidsperioder för att uppnå den valda syrehalten.

Alphameter installerades i en av åtta luftningsbassänger på Himmerfjärdsverket. Den använder en eller två huvar som placeras på vattenytan för att kunna analysera syrehalten i avgående luft från ytan på luftningsbassängen. Genom att mäta den procentuella skillnaden mellan syrehalten på den luft som skickas in till luftningsbassängen och syrehalten på den luft som avgår från vattenytan kan mängden syre som löser sig i vattnet beräknas. Alphameter kan därmed beräkna den exakta luftmängd som krävs för att få den syrehalt i vattnet som efterfrågats.

En annan av de åtta luftningsbassängerna valdes ut som referens för att kunna undersöka om Alphameter var bättre på att reglera luftflödet än nuvarande reglering. Justeringar gjordes i båda bassängerna för att förutsättningarna skulle vara lika under utvärderingsperioden. De båda bassängerna analyserades också under en annan period när endast den ordinarie regleringen användes, detta för att undersöka om det fanns skillnader mellan linjerna som inte berodde på vilken typ av reglering som användes. Analyser gjordes på mängden inkommande och utgående ammoniumkväve för att

undersöka mängden kväve som omvandlades i båda luftningsbassängerna. Mängden luft som tillsattes under respektive utvärderingsperiod uppmättes.

Resultatet visar att bassängen där Alphametern installerades (linje 7) använde mindre luft per kilo omvandlad ammoniumkväve i jämförelse med linje 6 både när Alphametern och den ordinarie reglering styrde luftflödet. Det visar på att den skillnaden som fanns mellan Alphameterbassängen (linje 7) och referensbassängen (linje 6) berodde således inte på Alphametern. Alphametern kunde därmed inte påvisa någon förbättrad energieffektivisering under de specifika reglerinställningarna som användes under utvärderingsperioden. Eftersom utvärderingsperioden endast varade under en vecka går det dock inte dra några slutsatser för hur Alphametern skulle prestera över en längre period, till exempel ett år.

Undersökningen visade också att Alphametern inte kunde ge en tidigare signal vid en eventuell störning i processen, vilket var förhoppningen vid installationen. Alphametern kan dock ge ytterligare information vid en störning i form av syreupptagningshastigheten (OUR-värdet), vilket visar på mängden syre som tas upp av bakterierna i den luftade bassängen. Vid ett eventuellt toxiskt inkommande material kan en del av bakterierna slås ut vilket kommer att ge ett lägre värde på OUR i de första zonerna och ett högre värde i sista zonen. Det kan vara en signal på att ett toxiskt material har inkommit till reningsverket och påverkat kvävereningen på ett negativt sätt. Ytterligare fördel med Alphameter är att den kan ge information om hur en jämn belastning kan skapas över hela bassängen, vilket kan leda till en energibesparing då andelen luft minskar samtidigt som tidigare reningsgrad behålls. Det förutsätter att luftflödet till respektive del i bassängen kan justeras separat, vilket inte var fallet på Himmerfjärdsverket.

Ordlista

AlfaF	Kvoten av SOTE i luftningsbassängen och SOTE beräknat (Appendix C)
AOTR	Faktisk syreöverföringshastighet (eng. Actual Oxygen Transfer Rate)
Aerob	Miljö där syre finns tillgängligt
Anaerob	Miljö utan tillgång på vare sig syre eller nitrat
Anoxisk	Miljö utan tillgång på syre
Autotrof	Organism som erhåller energi från koldioxid
BOD	Biologiskt syrebehov (eng. Biological Oxygen Demand)
DO	Syrehalt i vatten (eng. Dissolved Oxygen)
Heterotrof	Organism som använder organiskt material som energikälla
KLa	Syreöverföringsfunktionen
Nitrifikation	Bakteriell omvandling av ammonium till nitrat
NH₄-N	Ammoniumkväve
OTE	Syreöverföringseffektiviteten (eng. Oxygen Transfer Efficiency)
OTR	Syreöverföringshastigheten (eng. Oxygen Transfer Rate)
OUR	Syreupptagningshastigheten (eng. Oxygen Uptake Rate)
ROTR	Nödvändig syreöverföringshastighet (eng. Required Oxygen Transfer Rate)
Slamålder	Medeluppehållstiden för en slampartikel i luftningsbassängen
SOTE	Standard syreöverföringseffektivitet (eng. Standard Oxygen Transfer Efficiency)
TOC	Totalt organiskt kol (eng. Total Organic Carbon)

Innehållsförteckning

Referat	i
Abstract	ii
Förord	iii
Populärvetenskaplig sammanfattning	iv
Ordlista	vi
1. Inledning	1
1.1 Problemformulering och syfte.....	1
1.2 Arbetsgång och avgränsningar	2
2. Bakgrund.....	3
2.1 Aktivslamprocessen.....	3
2.1.1 Slamålder	3
2.1.2 Mikrobiologi	4
2.1.3 BOD	5
2.1.4 Kväverening.....	5
2.1.5 Luftning av aktivslamprocessen	6
2.2 Himmerfjärdsverket	7
2.2.1 Energi och inkommande vatten.....	8
2.2.2 Utsläppsvillkor	9
2.2.3 Utslagning av aktivslamprocessen	9
2.3 Reglerteknik i avloppsreningsverk.....	10
2.3.1 Grundläggande reglerteknik	10
2.3.2 PID-reglering	10
2.3.3 Kaskadreglering.....	11
2.3.4 Ammoniumreglering	12
2.4 Alphametern	13
2.4.1 Skillnader mellan Alphameter och konventionell syrehaltsreglering	14
2.4.2 Alphameterns metod och beräkningar	15
2.5 Luftningssteget på Himmerfjärdsverket.....	17
2.5.1 Referenslinjen.....	20
2.5.2 Alphameterlinjen.....	21
2.6 Tidigare studier	22
2.6.1 Off-gas utrustning	22
2.6.2 Information om membranens tillstånd	24
2.6.3 Tidigare fullskaleförsök på Himmerfjärdsverket	25
3. Metod.....	26
3.1 Förberedande arbete.....	26
3.2 Förutsättningar	26

3.3	Provtagning	27
3.4	Installation av Alphameter	27
3.5	Utvärdering av processövervakning	30
3.6	Utvärdering av reglering	31
4.	Resultat	34
4.1	Inställning av reglerparametrar.....	34
4.2	Processövervakning	36
4.2.1	Justering av luftflödet och platsspecifika värden till zon 2.....	38
4.3	Reglering	41
5.	Diskussion	46
5.1	Processövervakning	46
5.2	Reglering	48
5.3	Installation av Alphametern	51
5.4	Förbättringsmöjligheter för utvärderingen	52
5.5	Framtida studier.....	52
5.6	Felkällor	53
6.	Slutsatser	55
	Referenser	56
	Appendix A.....	58
	Appendix B.....	59
	Appendix C.....	61
	Appendix D.....	62
	Appendix E.....	63
	Appendix F.....	64

1. Inledning

Vid ett avloppsreningsverk står luftningsprocessen för en stor del av energiförbrukningen (Jenkins, 2014; Åmand & Carlsson, 2012). På Himmerfjärdsverket, ett reningsverk beläget i botkyrka kommun, står luftningen för cirka 18 % av den totala energiförbrukningen (Andersson, 2012). Det är därmed viktigt att optimera luftningsprocessen och reningen av organiskt material (eng. Biological Oxygen Demand (BOD)) och kväve. Tidigare studier på verket har undersökt olika reglerstrategier för luftningsprocessen där resultaten har visat på energibesparing i form av mindre luftflöden (Andersson, 2012)(Åfeldt, 2011). Inför den framtida ombyggnationen vill Syvab undersöka om en Alphameter kan skapa ytterligare minskning av energibehovet i luftningssteget. Alphametern analyserar den luft som avgår från ytan (så kallad off-gas) på luftningsbassängen och genom beräkningar baserat på off-gas reglerar den luftflödet till bassängen. Från tidigare studier av Alphametern har en stabilare process och minskad luftning per renad mängd kväve kunnat uppnås. Vid användning av Alphametern på Erlangen avloppsreningsverk kunde en energibesparing på mellan 15-20 % relativt tidigare reglering uppnås (Trillo & Smith, 2014).

Syvab vill också undersöka om Alphametern kan användas för en snabbare detektering av föroreningar och störningar i luftningssteget. Under hösten 2013 slogs det biologiska steget ut i Himmerfjärdsverket på grund av utsläpp av toxiska ämnen från en industri i upptagningsområdet. Det gjorde att verket förlorade sin kväverening under flera månader.

1.1 Problemformulering och syfte

Syftet med studien var att undersöka om implementering av en Alphameter i Himmerfjärdsverket kunde minska energianvändningen i luftningssteget och förbättra övervakningen av aktivslamprocessen.

Studien ville besvara följande frågor:

- Vilken reglering är den mest energieffektiva under samma reningsgrad - Alphameter eller konventionell reglering?
- Kan Alphametern ge en tidigare signal vid en störning i luftningssteget i jämförelse med befintlig mätutrustning?
- Vilka är fördelarna respektive nackdelarna med en Alphameter i luftningsbassängen i ett reningsverk?

Hypoteser:

- Luftflödet blir lägre än dagens förbrukning vid implementering av Alphametern

- Alphametern ger ökad möjlighet till att tidigt upptäcka störningar i kväveprocessen i jämförelse med befintlig mätutrustning och därmed kunna sätta in driftåtgärder snabbare, vilket kan minska risken för påverkan på kväveprocessen.

1.2 Arbetsgång och avgränsningar

En förstudie gjordes med fördjupning inom aktivslamprocess, reglerteknik, tidigare studier på Himmerfjärdsverket, Himmerfjärdsverkets reningssteg, Alphametern och tidigare studier med off-gas utrustning.

Därefter utfördes ett fullskaleförsök med Alphameter i linje 7 på Himmerfjärdsverket där Alphametern hade installerats. Alphametern har jämförts med konventionell syrehaltsreglering i linje 6 och utvärderats i form av mängd luft per kilo omvandlad ammoniumkväve i respektive linje. Alphameterns möjlighet till att tidigt ge signaler vid toxiska ämnen har diskuterats och processparametrar som ges av Alphametern har presenterats. Två olika inställningar hos Alphametern för att övervaka luftningsbassängen har undersökt. Alphameterns för och nackdelar har också diskuterats.

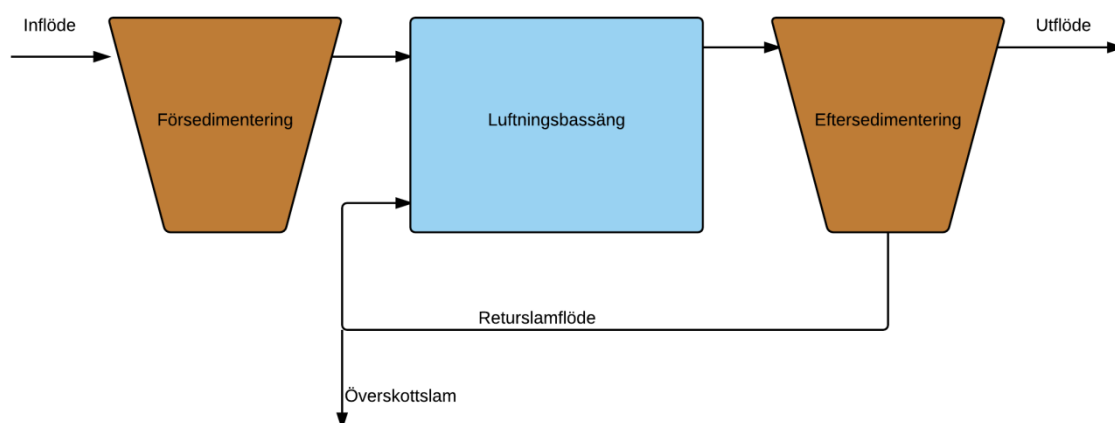
Följande avgränsningar har gjorts:

- Rapporten berör endast luftningssteget och nitrifikationen i aktivslamprocessen och inte denitrifikationssteget.
- Rapporten berör endast halten ammoniumkväve och inga analyser har utförts på halten nitrit och nitrat i luftningsbassängens utgående vatten och därmed ingen analys om nitrifikationens fullständighet
- Eftersom Himmerfjärdsverkets luftningssystem inte var tillräckligt för att uppnå det luftflöde som efterfrågades under dygnets högt belastade timmar gäller utvärderingen endast för de timmar där luftflödet inte ligger på maximal kapacitet.
- Processparametrarna från Alphametern vid huv 2, zon 6, har inte redovisats eftersom förutsättningarna för att få korrekta värden från huv 2 inte var uppfyllda.
- Av den energi som krävs för att tillsätta luft till luftningsbassängerna har endast elmotorns energi beräknats och inte gasmotorns energi, då verket är självförsörjande på biogas.

2. Bakgrund

2.1 Aktivslamprocessen

Aktivslamprocessen består vanligtvis av en luftningsbassäng och en eftersedimentering. I luftningsbassängen tillsätts luft för att hjälpa mikroorganismerna att omsätta organiskt material och kväve samt för att hålla slammet suspenderat. För att en bra process ska kunna uppehållas återförs en del av slammet till luftningsbassängen (Figur 1) (Tchobanoglous et al., 2003). I aktivslamprocessen växer bakterier ihop och kan därmed sedimentera, vilket är grunden för att processen ska fungera (Svenskt Vatten AB, 2013).



Figur 1. Principskiss av en aktivslamprocess.

Avloppsvattnet kommer in till försedimenteringen och en del av materialet sedimenterar. Vattnet går sedan vidare till luftningsbassängen där luft tillförs och slammet hålls suspenderat. Från luftningsbassängen går vattnet till eftersedimenteringen där slammet avskiljs och en del av slammet återförs till luftningsbassängen för att inte allt slam ska försvinna från luftningsbassängen. En tillväxt av mikroorganismer sker i luftningsbassängen och en del av slammet (mikroorganismer som klumpar ihop sig) återförs till den luftade zonen och överskottet tas bort för vidare behandling (Svenskt Vatten AB, 2013). Vid grundutförande för aktivslamprocessen tillförs avloppsvattnet i början på luftningsbassängen. Därmed avtar även den biologiska aktiviteten längs med bassängen. För att lösa det problemet kan stegbeskickning användas, vilket innebär att avloppsvattnet fördelas över en viss sträcka i bassängen istället för att tillföras via ett inlopp i början. Detta ger en jämnare syreförbrukning i bassängen (Svenskt Vatten AB, 2013).

2.1.1 Slamålder

Det krävs att en tillräckligt stor del av slammet återförs för att det ska finnas tillräckligt med mikroorganismer i luftningsbassängen. Slamåldern definieras som kvoten mellan

total massa slam i luftningsbassängen och uttagen massa slam per tidsenhet (oftast dagar) enligt

$$\text{Slamålder} = \frac{V \times SS_p}{Q_o \times SS_o + Q_{ut} \times SS_{ut}} \quad (1)$$

där $V(\text{m}^3)$ är volymen av luftningsbassängen, SS_p (g SS/ m^3) är slamhalten i processen (luftningsbassängen), Q_o (m^3/h) är överskottsslamflöde, SS_o (g SS/ m^3) är slamhalten på överskottsslamflödet, Q_{ut} (m^3/h) är vattenflödet ut från luftningsbassängen, SS_{ut} (g SS/ m^3) är slamhalten på utgående vatten. Med andra ord är slamåldern den medeltid som en slampartikel uppehåller sig i luftningsbassängen. Genom att ta ut en större mängd överskottsslam kan slamåldern minskas och vice versa. Det är viktigt att slamåldern är anpassad så att inte för stor eller liten mängd slam tas ur systemet. För liten slamålder kan innebära en förlust av mikroorganismer som tar lång tid att få tillbaka. För hög slamålder kan innebära att eftersedimentering inte klarar av att sedimentera allt slam och en del av slammet hamnar i utgående vatten. En normal slamålder är mellan 10-15 dygn (Carlsson, 2012).

2.1.2 Mikrobiologi

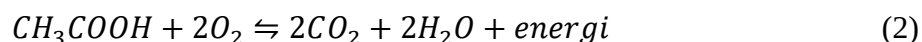
Mikroorganismerna i aktivslamprocessen består av bakterier, jäst, mögelsvampar, protozoer och alger. Slammet som bildas i luftningssteget består till största delen av bakterier som också är den viktigaste mikroorganismen i en aktivslamprocess. De är dominerande och kan hittas i flera hundratals olika arter. Bakterierna förökar sig genom delning och är antingen heterotrofa eller autotrofa. Heterotrofa bakterier är de mest förekommande och använder sig av organiskt material för nybildning av bakterier. Autotrofa bakterier använder oorganiskt material för nybildning av bakterier. Energin får heterotrofa bakterier oftast från organiskt material medan autotrofa får sin energi från den kemiska reaktionen vid nedbrytning av oorganiskt material. I en aktivslamprocess finns många olika typer av bakterier och det råder stor konkurrens. Det leder till att bakterierna som har högst tillväxthastighet i de rådande förhållandena också dominerar. Genom att avloppsvattnets sammansättning kontinuerligt förändras leder det till att bakteriesamhället förändras över tiden. Det ger ett artrikt bakteriesamhälle vilket kan anpassas efter olika föroreningar som inkommer till avloppsreningsverket (Svenskt Vatten AB, 2013).

Bakterierna kräver tillgång till organiskt kol och andra viktiga ämnen för deras metabolism. Hos de andra viktiga ämnena är det främst tillgången på kväve (N) och fosfor (P) som är mängdmässigt viktigast. Hos en bakterie är 12 % av torrsubstansen (TS) kväve och 2 % fosfor. I ett kommunalt avloppsreningsverk finns normalt god tillgång på alla de viktiga ämnena för en god tillväxt av bakterier. Om avloppsreningsverket tar emot vatten från industrier finns det risk för toxiska ämnen som kan störa de biologiska processerna (Svenskt Vatten AB, 2013).

2.1.3 BOD

Biologiskt syrekrav (eng. Biological Oxygen Demand (BOD)) är ett mått på mängden organiskt material i avloppsvattnet. Nedbrytningen av organiskt material (ex. CH_3COOH) sker med hjälp av syre som elektronmottagare. Slutprodukten blir koldioxid, vatten och den energi som mikroorganismerna kan tillgodogöra sig (Tchobanoglous et al., 2013).

Aerob nedbrytning:



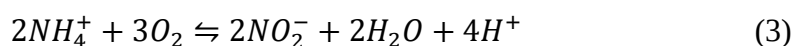
Reningen av BOD i en aktivslamprocess fördelar sig inom dessa olika processer (Svenskt Vatten AB, 2013):

- Genom oxidation (30-50 %)
- Tas bort i överskottsslammet (40-45 %)
- Avgår med utgående vatten (inte förbrukat substrat) (10-25 %)

2.1.4 Kväverening

Kvävereningen sker genom nitrifikation, där ammonium (NH_4^+) först oxideras till nitrit (NO_2^-) (Ekvation 3) med hjälp av ammoniumoxiderande bakterier (t.ex. Nitrosomonas) och syre. För att senare oxideras till nitrat (NO_3^-) (Ekvation 4) med hjälp av nitritoxiderande bakterier (t.ex. Nitrobacter) (Tchobanoglous, et al., 2003).

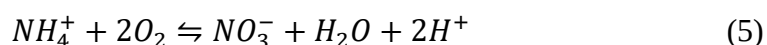
Nitroso-bakterier:



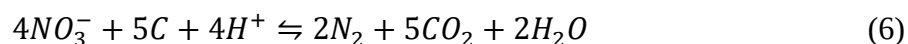
Nitro-bakterier:



Total reaktion:



Efter det steget kommer avloppsvattnet in i en anoxisk zon (syrefri miljö) där denitrifikationen äger rum (Ekvation 6). Denitrifikationen omvandlar nitrat till kvävgas med hjälp av heterotrofa bakterier och lättillgängligt kol. Denitrifikationen sker under anoxiska förhållanden där bakterierna andas med nitrat istället för syre enligt



Kvävereningens hastighet påverkas av syrehalten i vattnet, mängden icke organiskt substrat, slamåldern, temperatur, pH och toxiska utsläpp (Åmand, et al., 2013).

2.1.5 Luftning av aktivslamprocessen

Vid luftningen av avloppsvattnet är det fördelaktigt att skapa så små luftbubblor som möjligt eftersom det ökar den totala kontaktytan med vattnet. Små bubblor skapar också en längre kontakttid med avloppsvattnet då de stiger långsammare (Lindberg, 1997).

Nitrifikationen beror till stor del på mängden löst syre i vattnet (eng. Dissolved Oxygen (DO)) (Lindberg, 1997). Mängden syre som förbrukas per gram ammoniumkväve är 4,57 g O₂ (Tchobanoglous, et al., 2003). Det är vanligt att syrebörvärdet (det värde som vill uppnås) anges till 2,0 mg/l (Carlsson & Hallin, 2010). Det är möjligt att öka nitrifikationshastigheten till och med syrehalter på 3-4 mg/l. Vid låga syrehalter (< 0,5 mg/l) påverkas nitrifikationen negativt och det är främst nitro-bakterierna som hämmas vilket leder till höga halter av nitrit (Tchobanoglous, et al., 2003). Det finns även risk att filamentbildande bakterier konkurrerar med flockbildande bakterier vid låga syrehalter (< 1,5 mg/l) (Martins, et al., 2004). Bakterietillväxten i ett aktivt slam är inte linjärt beroende av koncentrationen av löst syre och ammonium (Åmand & Carlsson, 2012).

För att beskriva svårigheten att rena avloppsvattnet används Alfa, vilket definieras enligt

$$Alfa = \frac{K_L a_{Avloppsvatten}}{K_L a_{rent vatten}} \quad (8)$$

där $K_L a_{Avloppsvatten}$ är syreöverföringsfunktionen i avloppsvatten och $K_L a_{rent vatten}$ är syreöverföringsfunktionen i rent vatten. Alfa är en beskrivning på hur svårt det är att rena avloppsvattnet (Lindberg, 1997). Alfa kan variera mellan 0,4-0,9 för små bubblor (Tchobanoglous, et al., 2003).

$K_L a$ definieras av en syreöverföringsfunktion och beskriver hastigheten av syreöverföringen till aktivslamprocessen från luftningssystemet. För att beskriva syreöverföringshastigheten till vatten används $K_L a$ som beror av luftflödet till vattnet. Syrehaltens (DO) förändringshastighet beskrivs enligt (Lindberg, 1997)

$$\frac{d(DO(t))}{dt} = \frac{Q(t)}{V} (DO_{in}(t) - DO(t)) + K_L a (q_{air}(t)) (DO_{sat} - DO(t)) - R(t) \quad (9)$$

där $\frac{d(DO(t))}{dt}$ är förändringshastigheten av DO, $Q(t)$ är flödet av inkommande vatten, V är volymen av avloppsvatten, $DO_{in}(t)$ är syrehalten i inkommande vatten, $DO(t)$ är syrehalten i bassängen, $q_{air}(t)$ är luftflödet till vattnet, DO_{sat} är mätandsvärdet för syrehalten, $R(t)$ är respirationshastigheten och DO_{sat} är större än $DO(t)$. Syreöverföringsfunktionen beror i verkligheten inte bara av luftflödet till vattnet utan också av bland annat funktionen hos luftningssystemet, vattentemperatur och vattenkvalitén (Lindberg, 1997). $K_L a$ beror olinjärt på luftflödet. Det beror på att vid högre luftflöden minskar kontakttiden för luftbubblorna då bubblorna stiger snabbare samt att kontaktarean minskar på grund av att bubblorna slås ihop (Åmand & Carlsson, 2012).

2.2 Himmerfjärdsverket

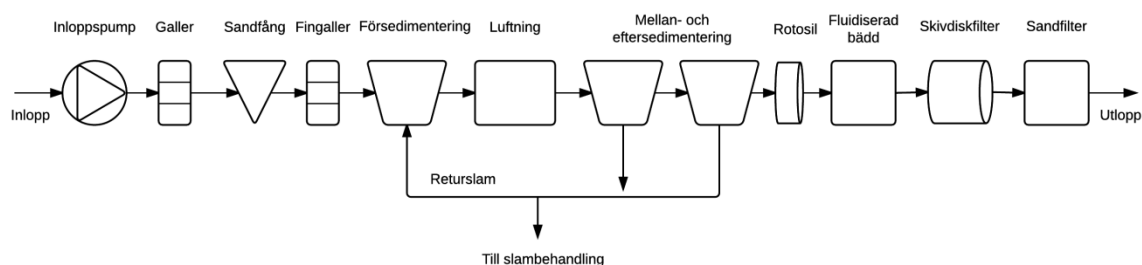
Om inget annat anges är information nedan baserad på Syvab (2015a) och Syvab (2015b).

Himmerfjärdsverket ligger i Grödinge i södra Botkyrka kommun. Verket invigdes år 1974 och är Sveriges femte största reningsverk. Ett tunnelsystem används för att transportera avloppsvatten från bland annat sydvästra Stockholm, Södertälje och Salem till reningsverket (Figur 2). Den största delen av transporten sker med självfall. Från det att konsumenten spolar ner vattnet tar det cirka 8-10 timmar innan det når reningsverket.



Figur 2. Karta över ledningsnätet som transporterar avloppsvattnet till Himmerfjärdsverket (Syvab, 2014b).

När vattnet når reningsverket ligger det 54 m under marken (Figur 3). Där finns kapacitet för lagring i fem dygn vid ovanligt högt flöde eller vid ett omfattande strömavbrott. Sedan passerar vattnet ett rensgaller som avlägsnar allt material större än 20 mm. Därefter tillsätts järnsulfat för att avskilja den lösta fosfor. Fosfor övergår då i fast form och kan avskiljas i senare steg i reningsprocessen. Vattnet pumpas sedan upp till marknivå.



Figur 3. En översikt av reningsstegen på Himmerfjärdsverket.

Första steget på marknivå är sandfången, som består av tre stycken bassänger, vardera 30 m långa. Där avskiljs sand och annat tungt material. I sandfången avskiljs tyngre

partiklar genom inblåsning av luft medan finare material hålls suspenderat. I slutet på sandfånet finns ett galler med 3 mm spaltvidd som finfördelar upp papper, textil och organiskt material. Avloppsvattnet kommer sedan till försedimenteringen där finare material avskiljs. Försedimenteringen består av 14 parallella bassänger på vardera 50 m. Bottensedimentering tas bort av bottenskrapor som transporterar det sedimenterade materialet till slamfickor. Slammet förtjockas för att senare stabiliseras i bioreaktorerna. Därefter kommer den biologiska reningen.

I det biologiska steget sker en fördelning på åtta luftningsbassänger där tillväxt av mikroorganismer sker. Vattnet blandas med bioslammet som innehåller mikroorganismer som omsätter löst organiskt material och fosfor i sin metabolism. Denna process omsätter också ammonium till nitrat och kallas nitrifikation. För att mikroorganismer ska kunna arbeta krävs syre vilket pumpas in genom ett stort antal membran i botten på bassängen. Vattnet kommer sedan vidare till mellansedimentering där kvarvarande bioslam sedimenteras och återförs till luftningssteget. Överskottet av bioslam (tillväxt av mikroorganismer) skickas vidare till flotationssteget för att inte det biologiska steget ska innehålla för mycket slam. I eftersedimenteringen avskiljs partiklar som inte hann sedimentera i mellansedimenteringen (så kallad tertiärslam) och skickas även det till flotationssteget. Innan fluidbädden går vattnet igenom en trumsil för att avlägsna eventuella partiklar som kan skada dysorna i fluidbädden.

Vattnet skickas nu vidare till en fluidiserad bädd där nitrat omvandlas till kvävgas genom denitrifikation. I den fluidiserade bädden finns miljardtals bakterier som sitter fast på sandkorn som hålls flytande genom det inströmmande vattnet från fördelningsdysor. Bakterierna omvandlar nitrat till kvävgas genom tillsats av metanol, vilket fungerar som kolkälla. Efter 10 min i den fluidiserade bädden kan upp till 95 % av nitraten omvandlas till kvävgas som avgår till luften.

I den fluidiserade bädden kan en del av biomassan som sitter på sanden lossna och det behöver rensas innan vattnet kan släppas ut i Himmerfjärden. Det görs genom tre par skivdiskfilter där hälften av partiklarna och det suspenderade materialet försvinner. Efter det finns ett 70 cm djupt sandfilter som är uppbyggt av finare material upptill och grövre material nedtill. Sandfiltret används i dagsläget inte i reningsprocessen då skivdiskarna har tagit över dess funktion. Vattnet går sedan vidare till utloppet i Himmerfjärden.

2.2.1 Energi och inkommande vatten

Himmerfjärdsverket tar emot avloppsvatten från 314 100 personer och 35 000 personekvivalenter från industrin. Medeltillrinningen till verket är cirka 4900 m³/h (1200 l/s) och det finns möjlighet att ta emot upp till cirka 6 500 m³/h (1 800 l/s) (Syvab, 2014b). Inkommande mängd vatten år 2014 var 43,1 miljoner m³. I det avloppsvattnet fanns totalt 5690 ton BOD₇, 142 ton fosfor och 1530 ton kväve (Syvab, 2014c). Efter rening i verket innehöll avloppsvattnet totalt 306 ton BOD₇, 15 ton fosfor och 363 ton kväve. Den totala minskningen för år 2014 av BOD, fosfor och kväve var

95, 89 respektive 76 %. Elförbrukningen inom verket var år 2014 cirka 25 000 MWh (Syvab, 2014a).

2.2.2 Utsläppsvillkor

Från beslut (gällande från 2013) av Mark- och miljööverdomstolen får utsläppen av totalkväve inte överstiga 8 mg/l som årsvärde och utsläppen av totalfosfor får inte överstiga 0,4 mg/l om årsvärde. Utsläppsvillkoren för BOD₇ är fastställda till 8 mg/l som kvartalsvärde. För COD gäller föreskriften på 70 mg/l som årsvärde (Syvab, 2014c). Syvab har dessutom satt upp egna interna mål för reningen, vilket styr regleringen av verket (Tabell 1) (Stark Fujii, pers. medd.)

Tabell 1. Myndighetskrav från mark- och miljööverdomstolen och internmål för reningen av fosfor, kväve, BOD₇ och COD

Krav och mål	Tot-P	Tot-N	BOD ₇	COD
Krav (årsvärde, mg/l)	0,4	8	8	70
Interna mål (kvartalsvärde, mg/l)	0,35	7,5	7	50

Eftersom recipienten inte uppfyller god ekologisk status trots god reningsprocess väntar nu ännu hårdare krav på reningen. Föreslagna villkor är 0,2 mg/l på totalfosfor, 6 mg/l på totalkväve och 5 mg/l på BOD₇. De nya utsläppskraven förväntas fastslås under 2016 (Syvab, 2015b).

2.2.3 Utslagning av aktivslamprocessen

Under hösten 2013 tog verket emot ett industriutsläpp i form av ett lim vilket resulterade i ett helt utslaget nitrifikationssteg. Genom mikroskopieringsanalyser kunde ses att mikroorganismerna försvann från slammet och flockarna dispergerade och blev mindre. Till en början fanns en försämrad nitrifikation, men efter några veckor var den helt utslagen. Aktiviteten hos de ammoniumoxiderande bakterierna (AOB) gick ner till hälften och de nitritoxiderande bakterierna (NOB) försvann från processen. Ett flertal insatser gjorde för att återfå nitrifikationen: minskad belastning, ökat luftflöde, ökat returslamflöde och intag av slam från andra avloppsreningsverk. Analyser efter utslagningen visade att AOB:erna snabbare kom tillbaka medan de NOB:erna var helt borta från processen. Under flera månader uppnåddes endast delvis nitrifikation där ammonium omvandlades till nitrit. I augusti 2014 återkom produktionen av nitrat och därmed en fullständig nitrifikation. Cirka ett år efter utslagningen visar laborationsanalyser att mängden NOB långsamt ökar samtidigt som mångfalden ökar. Utslagningen visade att NOB var mycket mer känslig mot föroreningar och processtörningar än AOB (Stark Fujii, pers. medd.)

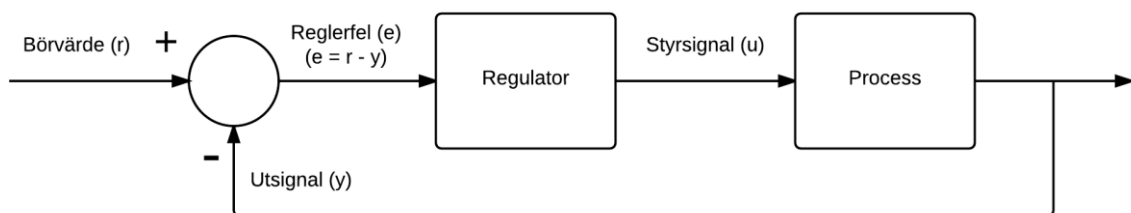
2.3 Reglerteknik i avloppsreningsverk

De avancerade processerna som sker i avloppsreningsverk kräver en avancerad reglering och övervakning. Detta för att uppnå ett effektivare driftsätt och effektiv rening. Genom reglerteknik kan en hög, jämn och kostnadseffektiv rening uppnås (Carlsson & Hallin, 2010).

I en aktivslamprocess regleras syrehalten i avloppsvattnet. Grunden för att nitrifikation ska fungera är tillförsel av syre till avloppsvattnet. Det är viktigt att syrehalten är inom ett visst intervall för att reningen inte ska hämmas. Genom att införa reglering för luftningen i aktivslamprocessen kan energiförbrukningen gällande luftningen minska med 10-20 %. Eftersom belastningen förändras över tiden krävs att regleringen av luft är dynamisk. Ett konstant minsta luftflöde skulle ge onödigt hög syresättning och öka driftkostnaderna. Det finns två strategier för att reglera luftningen i en aktivslamprocess: reglering av lufttillförsel i varje zon och reglering av totala lufttillförseln genom tryckreglering av blåsmaskiner (Carlsson & Hallin, 2010).

2.3.1 Grundläggande reglerteknik

Reglerteknik handlar om att styra olika processer automatiskt. Eftersom de flesta system är dynamiska krävs en regulator som kan justera processen beroende på vilken utsignal (y) som vill uppnås. Det värde som vill uppnås i processen kallas börvärde (r). Differensen mellan värdet som vill uppnås i processen (börvärdet) och det värde som ges (utsignalen), kallas reglerfelet (e). Regulatorn använder reglerfelet för att öka eller minska styrsignalen (u) beroende på om utsignalen är lägre eller högre än börvärdet. Regulatorn ger en styrsignal till den process som vill styras. Processen justerar därmed utsignalen för att närma sig börvärdet. Vanligt är en användning av återkoppling från utsignalen enligt Figur 4 (Carlsson & Hallin, 2010). Börvärdet (r) och utsignalen (y) summeras och ger reglerfelet (e) till regulatorn. Regulatorn skickar sedan en styrsignal (u) till processen som justerar utsignalen (y) för att utsignalen ska närma sig börvärdet.



Figur 4. Grundläggande principskiss vid reglering av en process.

2.3.2 PID-reglering

De flesta regulatorer inom industrin använder sig av PID-regulatorer (Carlsson & Hallin, 2010). P står för en proportionell del, I står för en integrerande del och D står för en deriverande del. Beroende på hur komplex process som ska styras kan olika

regulatorer användas. En P-regulator använder en förstärkning (K) och reglerfelet (e) enligt

$$u(t) = Ke(t) \quad (10)$$

där styrsignalen (u) är direkt proportionell till reglerfelet och vid ökat reglerfel ökar styrsignalen. Problemet med en P-regulator är att reglerfelet aldrig kan bli noll, för då blir också styrsignalen noll. Ett stort värde på förstärkningen gör att reglerfelet minskar men regleringen kan då bli för slängig.

En PI-regulator består av en proportionell del (P) samt en integrerande del (I) enligt

$$u(t) = K(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau) \quad (11)$$

där den integrerande delen summerar reglerfelet under en viss vald tidsperiod (T_i). Det gör att vid ett positivt reglerfel minskar styrsignalen och vid ett negativt reglerfel ökar styrsignalen. Ett stort värde på variabeln T_i ger en liten påverkan på styrsignalen. Vid ett konstant reglerfel är värdet på T_i den tid som krävs för att styrsignalen ska fördubblas. En PI-regulator kan styra processen så att utsignalen blir lika med börvärdet och därmed blir reglerfelet lika med noll. Det bygger dock på att ställdonet/processen som tar emot styrsignalen kan ge den effekt som krävs för att uppnå börvärdet. Vid reglering av syrehalten i en luftningsbassäng skulle det innebära att blåsmaskinerna inte har den kapacitet som krävs för att uppnå en viss syrehalt i bassängen. I det fallet kommer reglerfelet inte att bli noll oavsett hur stark insignalen är. En PI-regulator klarar av att styra de flesta processer inom industrin där inte höga krav på snabb reglering gäller (Carlsson & Hallin, 2010).

En PID-regulator består av en proportionell (P), en integrerande (I) och en deriverande del (D) enligt

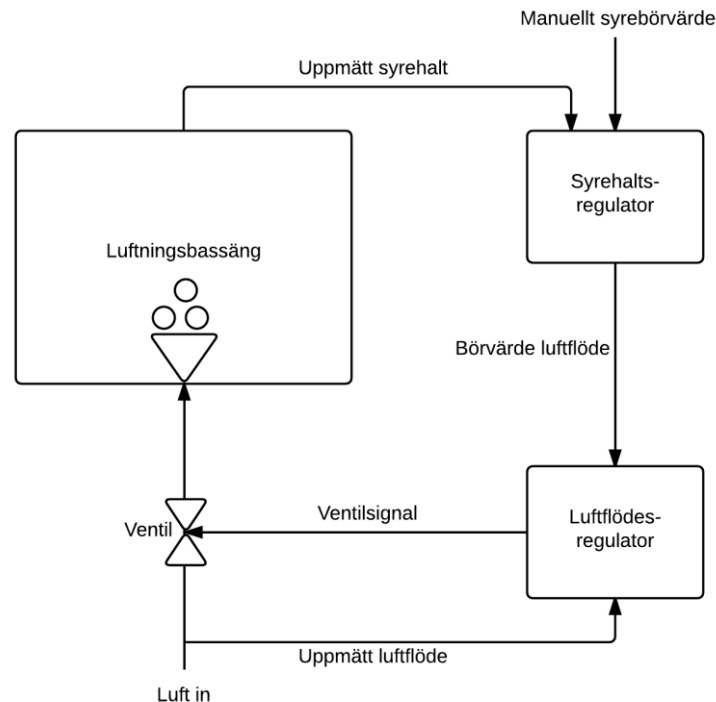
$$u(t) = K(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt}) \quad (12)$$

där förändringshastigheten på reglerfelet tas med i regleringen. Om reglerfelet förändras snabbt på grund av en yttre störning ger den deriverande delen en snabb ökning av styrsignalen. Parametern T_d benämns deriveringstid och anger hur stor effekt deriveringsdelen (D) ska ha på styrsignalen. En PID-regulator har svårt att hantera mätbrus på utsignalen och långa dötider (tiden från styrsignal till respons på utsignalen). Vid sådana system är det bättre att använda en PI-regulator. Parametrarna K , T_i och T_d bestäms antingen manuellt eller genom inställningsmetoder (ex. Lambdametoden) (Carlsson & Hallin, 2010).

2.3.3 Kaskadreglering

Kaskadreglering innebär att processen har två regulatorer där utsignalen från den överordnade regulatorn är börvärde för den underordnade regulatorn (Figur 5). Denna

reglerstrategi är vanlig vid luftning av en aktivslamprocess. I en sådan process ges ett manuellt börvärde på syrehalten i bassängen. Börvärdet och den uppmätta syrehalten ger ett reglerfel till syrehaltsregulatorn som i sin tur skickar ett börvärde till luftflödesregulatorn. Den ger i sin tur en signal till luftventilen som justerar luftflödet till bassängen. En inre återkoppling sker från uppmätt luftflöde till luftflödesregulatorn, som snabbt kan justera luftflödet vid eventuella störningar (Carlsson & Hallin, 2010).



Figur 5. Kaskadreglering där syrehaltsregulatorn är överordnad luftflödesregulatorn.

2.3.4 Ammoniumreglering

Ammoniumreglering innebär att en ammoniumgivare placeras i luftningsbassängen eller i utloppet av luftningssteget. Den skickar sedan en mätsignal till en ammoniumregulator, vilket beräknar ett syrebörvärde för syrehaltsregulatorn. Det beräknade syrebörvärdet varierar beroende på halten av inkommande ammonium till luftningsbassängen. Ammoniumhalten kan mätas antingen i inloppet eller utloppet och därmed kan både framkoppling och återkoppling fås av en ammoniumreglering. Ammoniumreglering kan också benämnas som en trippelkaskadreglering (Åmand, 2015).

2.4 Alphametern

Om inget annat anges är informationen nedan baserad på Invent Aeration Services S.r.l. (2010).

Alphameter är en mätutrustning som kan användas för förbättrad processövervakning i luftningsbassängen på ett reningsverk. Utrustningen ger viktiga processparametrar inom luftningsdesign och erbjuder möjligheten att reglera luftflödet i luftningsbassängen utifrån dessa processparametrar. Alphametern analyserar bland annat den luft som avgår från vattenytan i en luftningsbassäng, så kallad "off-gas". Den har inte tidigare använts på avloppsreningsverk i Sverige men på några avloppsreningsverk i Europa. Den används för att få en förbättrad reglering och övervakning av processerna i luftningsbassängen. Övervakning sker i både gas- och vätskefas och ger möjlighet till en direkt feedback på hur syrebehoven ser ut och hur luftningsprocessen fungerar. Alphametern ger nyckelparametrar inom kontroll och luftning för avloppsreningsverk enligt

- Syreöverföringseffektiviteten (eng. Oxygen Transfer Efficiency (OTE))
- Standardsyreöverföringseffektiviteten (eng. Standard Oxygen Transfer Efficiency (SOTE))
- Syreöverföringshastigheten (eng. Oxygen Transfer Rate (OTR))
- Syreupptagningshastigheten (eng. Oxygen Uptake Rate (OUR))
- AlfaF-värdet (αF)

OTE (%) anger andelen av syret som övergår från gasfas till vätskefas. SOTE (%) anger OTE vid 20 °C, 1 atm och det specifika processvatten med en syrehalt på 0 mg/l. OTR (kg O₂/h/l) anger mängden syre som överförs till vätskefas. OUR (mg/l/h) anger mängden syre som tas upp av mikroorganismer i aktivslamprocessen. AlfaF anger kombinationsfaktorn för membranens kvalitet (F) och syreöverföringshastigheten till avloppsvattnet (Alfa).

Alphametern består av en kontrollenhet och en eller två huvar som kopplas till kontrollenheten (Figur 6). Huvarna placeras ovanpå vattenytan för att fånga in den luft som avgår från luftningsbassängen. Luften pumpas från huven till styrenheten och där analyseras mängden syre, koldioxid samt temperatur och relativ fuktighet. Alphametern använder indata i form av syrehalt i bassängen, temperatur på processvattnet och luftflödet till luftningsbassängen.



Figur 6. Invents Alphameter med styrenhet (t.h.) och tillhörande huv (Publicerad med tillåtelse av Invent AS)

Eftersom Alphametern ger data i realtid kan snabba justeringar göras vid förändringar av belastningen. Utrustningen beräknar det luftflöde som krävs för att uppnå syrebörvärdet i processen. Genom förbättrad processövervakning kan utrustningen bidra till minskade energikostnader genom minskat luftflöde. Med Alphametern behövs inte konventionell reglering.

För övervakningssyfte behöver Alphametern information om platsspecifik data (Tabell 5). Om Alphametern ska användas för att reglera luftflödet behöver reglerinställningar definieras (Tabell 2).

Tabell 2. Regleringsinställningar för Alphametern om den ska reglera luftflödet

Beskrivning	Symbol	Enhet	Original
Börvärde för syrehalten	SP	mg/l	1,0
Tid för luftflödesändring för syrehaltsdifferens	DO _{diff}	min	10
Tidsintervall mellan beräkning av DO under icke jämvikt (Non Steady State (NSS))	NSS	min	5
Tidsintervall mellan analys av Off-gas	GAS	min	10

2.4.1 Skillnader mellan Alphameter och konventionell syrehaltsreglering

Om inget annat anges är information nedan baserat på Trillo och Smith (2014).

De flesta regelsystem för aktivslamprocess är idag direkt eller indirekt baserade på syrehaltsgivare. Börvärden på syrehalten sätts till ett visst värde (oftast högre än nödvändigt) och luftningen justerar efter differensen mellan börvärde och uppmätt värde hos syrehaltmätaren i bassängen. Vid för lågt värde på syrehaltmätaren i bassängen tillsätts luft och vice versa. Dock kan inte styrsystemet kvantifiera hur stor mängd syre som överförs till vattenfasen och därmed hur stor mängd som behöver tillsättas för att höja syrehalten med ett visst antal mg/l. Alphametern försöker kvantifiera vilket

luftflöde som behövs för att upprätthålla syrebörvärdet i jämförelse med konventionell reglering med syregivare som använder sig av regulatorer för att reglera luftflödet.

Beroende på hur stor del av det tillförda syret som övergår till vattenfasen (OTE) behöver mängden luft som pumpas in i aktivslamprocessen antingen höjas eller sänkas. Vid en kaskadreglering med syrehaltsgivare används oftast ett fast syrebörvärde. Förutsättningar för mängden syre som kan övergå till vattenfasen förändras av parametrar som påverkar syreöverföringen så som AlfaF och syrehalten. Vid en drastisk förändring i inkommande mängd organiskt material behövs en ökning av luftningen men ökningen tar inte hänsyn till OTE. Det kan leda till att under en kort period ökar luftflödet mer än vad som behövs för att upprätthålla syrebörvärdet. Eftersom Alphameteren beräknar OTE kan eventuellt detta ge ett mer korrekt luftflöde under perioder när förutsättningar för mängden syre som kan övergå till vätskefasen hastigt förändras.

Eftersom syreupptagningsförmågan (OUR) varierar mellan zonerna i luftningsbassängen kan olika luftflöden ställas in beroende på hur stor syreupptagningsförmågan är i de olika zonerna. Det leder till att mer luft kan tillsättas till de zoner som har en högre OTE och därmed kan mängden syre som går till vätskefas ökas. De zoner som har lägre OTE kan förses med en mindre del luft utan att mängden totalt syre som går från gasfas till vätskefas i hela bassängen minskar. Det förutsätter att zonvis reglering av luftflödet är möjligt.

2.4.2 Alphameterns metod och beräkningar

Om inte annat anges är informationen nedan baserad på Invent Aeration Services S.r.l. (2013) och Trillo, et al. (2002)

Alphameterns beräkningar bygger på "off-gas testing" definierad av American Society of Civil Engineers Standard ASCE-18-96 (1996). Eftersom Alphameteren kan mäta och beräkna de parametrar som påverkar syrehalten i vattnet försöker Alphameteren uppnå jämvikt mellan behövd syreöverföringshastighet för att nå syrebörvärdet (eng. Required Oxygen Transfer Rate (ROTR)) och aktuell syreöverföringshastighet (eng. Actual Oxygen Transfer Rate (AOTR)) enligt

$$ROTR = AOTR \quad (13)$$

Först analyseras off-gas från huven och beräkning utförs av volymprocent syre och koldioxid. Information om luftflöde, syrehalt och temperatur i processvattnet skickas kontinuerligt till utrustningen. Efter analys av off-gas beräknas OTE (%) enligt

$$OTE = \frac{V_{\%O_2 in} - V_{\%O_2 ut}}{V_{\%O_2 in}} \times 100 \quad (14)$$

där $V_{\%O_2 in}$ (%) är den volymprocent syre som pumpas in i luftningsbassängen, $V_{\%O_2 ut}$ (%) är den volymprocent syre som fångas upp av huven. OTE beror på typ av

luftningssystem (placering och typ), utformning på bassängen (längd, bredd och djup), luftflöde och karaktären på avloppsvattnet (Tchobanoglous, et al., 2003). OTE minskar med ökat luftflöde och ökad syrehalt i vattnet (Åmand & Carlsson, 2012). Efter beräkning av OTE beräknas SOTE (%) enligt

$$SOTE = \frac{OTE}{DO_{f20} - DO} \theta^{(20-T)} \times \beta DO_{20} \quad (15)$$

där SOTE är syreöverföringseffektiviteten vid rent vatten, 20 °C, 1 atm och en syrehalt på 0 mg/l, DO_{f20} (mg/l) är mättnadsgraden för syrehalten i rent vatten vid 1 atm, 20 °C och det specifika nedsänkingsdjupet för membranen, DO (mg/l) är koncentrationen av löst syre i bassängen, θ är en temperaturkoefficient (1,024), T (°C) är temperaturen på processvattnet, β är kvoten av syremättnaden vid processvatten och rent vatten och DO_{20} (mg/l) är mättnadsgraden för syrehalten i rent vatten vid 1 atm och 20 °C.

Efter beräkning av SOTE hämtas $SOTE_{calc}$ (för ett visst luftflöde per timme och membran) från regressionsanalysen mellan SOTE och luftflöde per timme och membran som måste anges som indata till Alphametern (Tabell 5 och Appendix C). Sedan beräknas AlfaF enligt

$$AlfaF = \frac{SOTE}{SOTE_{calc}} \quad (16)$$

där Alfa är ett mått på möjligheten för att föra över syre till processen och därmed hur svårt det är att rena avloppsvattnet, F är kvoten mellan nya membrans funktion och de aktuella membranens funktion, så kallad "Foulingfaktor". Sedan beräknas AOTR (kg/h) enligt

$$AOTR = AlfaF \times SOTE \times Q_{syre} \times \frac{\tau \beta \Omega DO_{20} - DO}{DO_{20}} \theta^{(T-20)} \quad (17)$$

$$(Q_{syre} = Q_{luft} \times \rho \times f) \quad (18)$$

där Q_{syre} (Nm³/h) är syreflödet till luftningsbassängen, τ är kvoten av syremättnaden vid aktuell temperatur och vid 20 °C, β är kvoten av syremättnaden vid processvatten och rent vatten, DO_{20} (mg/l) är mättnadsgraden för syrehalten i rent vatten vid 1 atm och 20 °C, DO (mg/l) är koncentrationen av löst syre i bassängen, θ är en temperaturkoefficient (1,024), T (°C) är temperaturen på processvattnet, Q_{luft} (Nm³/h) är det totala luftflödet till bassängen, ρ är densiteten av luft och f är andelen syre i luft.

För att kunna beräkna ROTR behövs information om syrebehovet i processen. OUR (mg/l/h) beräknas enligt

$$OUR = \frac{m_{O_2} - \Delta DO}{t} \quad (19)$$

där m_{O_2} (mg/l) är den del av syret som har överförs från gasfas till vätskefas, ΔDO (mg/l) är nettoändring av syrehalten (DO) och t är tiden angiven i timmar. Andelen av syret som inte övergår till vätskefas utan avgår från vattenytan upptas av huven och analyseras av Alphantern. Det totala syrebehovet beräknas sedan enligt

$$ROTR_{tot} = ROTR_{process} + ROTR_{förändring} + ROTR_{NSS} \quad (20)$$

där $ROTR_{process}$ står för processens efterfrågan på syreöverföringshastigheten, $ROTR_{förändring}$ är den förändring i luftflöde som eventuellt behövs för att ändra syrehalten i vatten till syrebövärdet. Off-gas analysen bygger på antagandet att det råder jämvikt (Steady State (SS)) under analysiden av off-gas. $ROTR_{NSS}$ är syrebehovsförändringen som råder under kontrollcykeln när icke jämvikt gäller (Non Steady State (NSS)). ROTR beräknas enligt

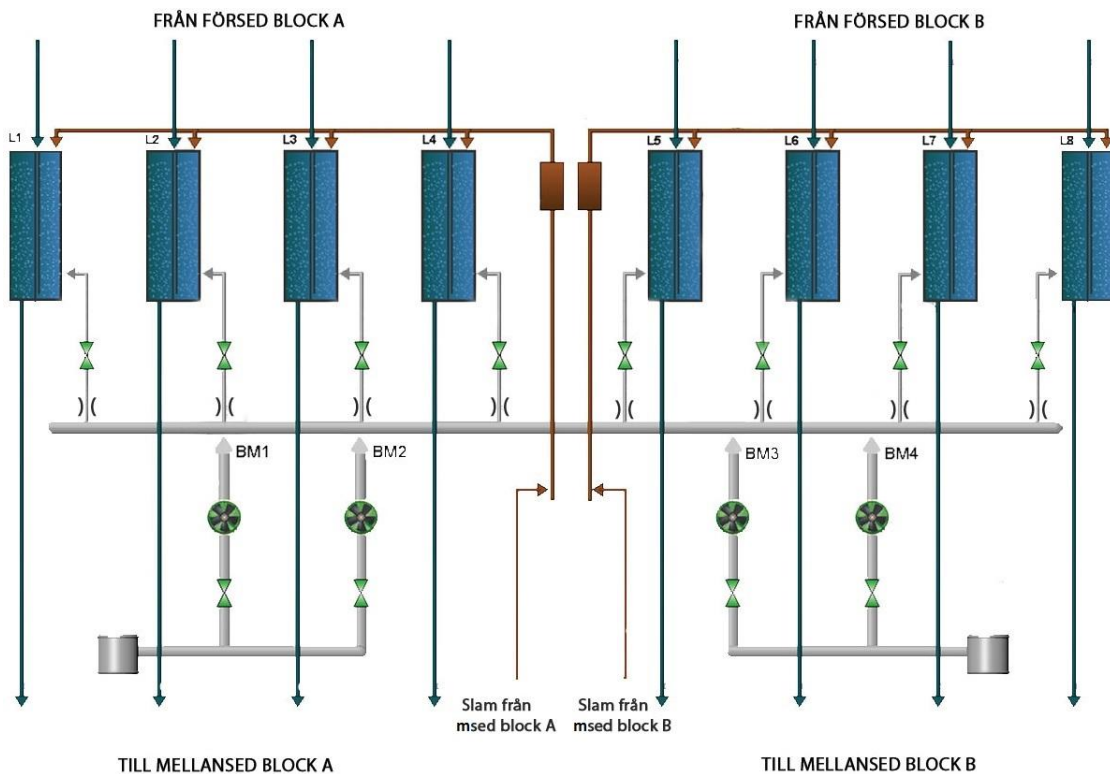
$$ROTR_{tot} = OUR \times V + \frac{DO - DO_{SP}}{t_c} \times V + \frac{DO_1 - DO_0}{t_1 - t_0} \times V \quad (21)$$

där V (m³) är volymen på bassängen eller zonen, DO (mg/l) är syrehalten i bassängen vid analys av off-gas, DO_{SP} (mg/l) är syrebövärdet, t_c (h) är reglerinställningsparametern, DO_{diff} (Tabell 2), vilket anger tiden för Alphantern att korrigera differensen mellan det faktiska syrevärdet och syrebövärdet, DO_1 (mg/l) och DO_0 (mg/l) är syrehalten vid tiden t_1 (h) respektive t_0 (h), är reglerinställningsparametern, NSS, anger tidsdifferensen mellan t_1 (h) och t_0 (h). För att AOTR skall bli lika med ROTR kan Q_{luft} (Nm³/h) som krävs för detta brytas ut från AOTR (Ekvation 17) enligt

$$Q_{luft} = \frac{ROTR_{tot} \times DO_{20}}{Alfa F \times SOTE \times \rho \times f(\tau \beta \Omega DO_{20} - DO) \theta^{(T-20)}} \quad (22)$$

2.5 Luftningssteget på Himmerfjärdsverket

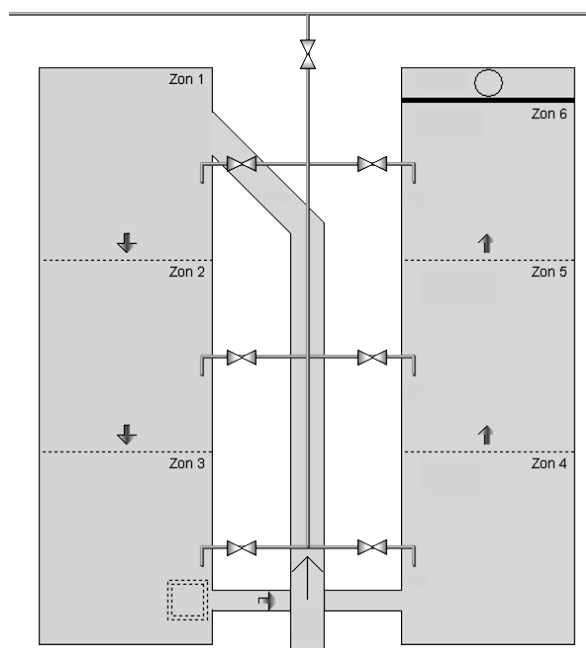
Luftningssteget består av åtta parallella bassänger som transporterar vattnet i en u-form (Figur 7). Dimensionen på hela luftningsbassängerna är 96 m lång, 6 m bred och 5 m djup och uppdelad i olika zoner (Figur 8). Bassängen smalnar av sista metern innan botten och därmed är bottenbredden där membranen sitter 4 m. Den utnyttjade volymen per bassäng är 2710 m³ (Syvab, 2014b).



Figur 7. De åtta parallella linjerna inom luftningssteget på Himmerfjärdsverket med tillhörande motorventiler, slamåterförsel och blåsmaskiner. På bilden saknas gasmotorn.

Luftbassängerna är uppdelade i två olika block där block A består av linjerna 1-4 och block B består av linjerna 5-8. Vattenflödet till varje linje regleras av luckor som finns i början på varje linje. Genom att sänka luckan till botten av kanalen kan flödet stängas av och vice versa. Luften till bassängerna tillförs av fyra eldrivna blåsmaskiner och en gasmotor. Varje linje har en separat ventil för att kunna justera luftflödet till hela bassängen (gäller inte linje 3). Genom att Himmerfjärdsverket producerar egen biogas kan den användas till att driva gasmotorn som förser luftningsbassängen med luft. Det innebär att alla elmotorer inte behöver vara i bruk samtidigt. Gasmotorn producerar konstant luft och blåsmaskinerna fyller på med luft för att hålla ett konstant tryck på 58 kPa i huvudledningen.

Inom varje linje finns 6 st. luftade zoner (Figur 8). Avloppsvattnet kommer från försedimenteringen och transporteras i en kanal som ligger mellan zon 1-3 och zon 4-6. Vattnet fördelas i luftningsbassängen genom stegbeskickning och det innebär ett utlopp i zon 1 och ett utlopp i zon 2. Transport sker sen genom zon 1-3 och därefter går vattnet igenom en kulvert för att komma upp i zon 4 och transporteras vidare till utloppet i zon 6.



Figur 8. De sex olika zoner för luftningssteget med pilar för att visa flödet av vatten genom processen. Timglasen i den övre delen av bilden visar luftningsventilen på huvudledningen in till linjen. Även de 6 manuella ventilerna för varje zon visas.

Inom varje zon finns det tallriksluftare av typen "Flygt Sanitaire Silver Series 2" som är installerade i botten på bassängen. Tallriksluftarna skapar små luftbubblor som på ett effektivt sätt kan syresätta avloppsvattnet. Genom att ammoniumhalten är störst i början på luftningsbassängen är också antalet luftare flest i zon 1 för att sedan minska i varje ny zon. Från utvärdering av driften har det framkommit att det krävs ett minsta luftflöde på 1,5 Nm³/h per membran (Wiig, 2012). Det beror på att lägre luftflöde skulle skapa en sedimentering och igensättning av membranen, vilket leder till försämrade luftning. Tabell 3 redovisar antalet membran och storlek på rören som förser membran med luft i block B.

Tabell 3. Antalet membran och storleken på luftrör i respektive zon för linje 5-8

Zon	Antal membran	Storlek på luftrör (mm)
1	343	160
2	295	160
3	222	160
4	185	110
5	149	110
6	135	110

Sommaren 2012 analyserades 5 membran från zon 1-3 och 5 membran från zon 4-6 på linje 8. Resultatet var att membranen var i gott skick och kunde prestera lika bra som nya membran. I Tabell 4 redovisas antal membran per linje i block B och hur länge de varit i drift.

Tabell 4. Totalt antal membran, storlek och zoner i respektive linje i block B, samt hur länge membranen har varit i drift

Linje	Antal membran	Antal zoner	I drift sedan	Storlek på membran (tum)
5	1329	6	aug 2004	9
6	1329	6	okt 2001	9
7	1329	6	aug 2004	9
8	1329	6	jul 2004	9

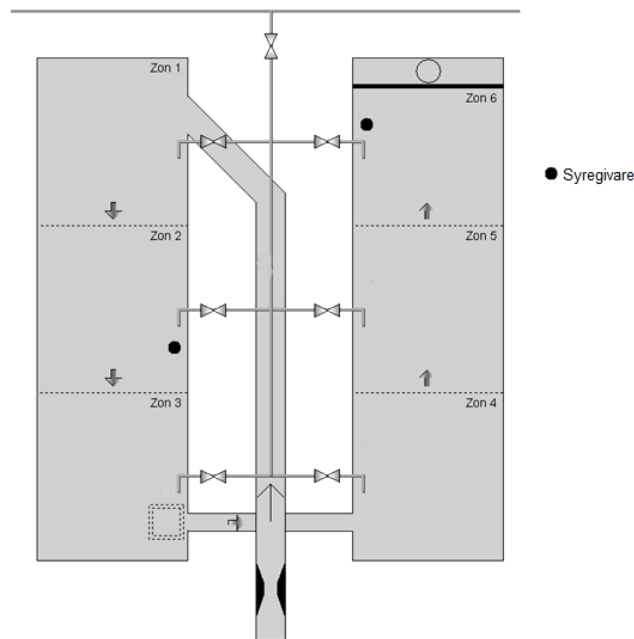
För att processen ska fungera korrekt krävs att delar av slammet som sedimenterar i mellansedimentering skickas tillbaka till luftningsbassängen. Slammet samlas upp i returslamgropar (en för varje block) för att kunna föra tillbaka en del av slammet till luftningsbassängen. Överskottsslam pumpas till flotationsanläggningen. Regleringen av returslam sker genom en manuellt reglerbar ventil som finns i mellansedimenteringen.

Inom varje linje i luftningsbassängen finns två syrehaltsgivare. De är placerade i zon 2 och zon 6. Mätning av lufttillförseln till varje linje sker vid respektive reglerventil på huvudledningen. Inom alla linjer förutom ammoniumlinjen (linje 3) finns en luftflödesregulator och en överordnad syrehaltsregulator. Ett börvärde för syrehalten sätts för hela bassängen och luftflödet till bassängen justeras efter uppmätt syrehalt i zon 2. Vid ordinarie reglering används ett syrebörvärde på 2,5 mg/l i alla linjer. Reglering sker genom kaskadreglering där syrehaltsgivaren ges ett börvärde och regulatören beräknar i sin tur ett börvärde till luftflödesregulatören som justerar luftventilens öppningsgrad. Alla regulatorer använder PID-reglering. In till varje zon finns också manuella ventiler som kan justeras med handkraft via ratt (Figur 8). Dessa ventiler är öppna till 100 % förutom i zon 6 där ventilen vanligtvis är öppen till cirka 50 %.

I maj 2015 kontrollerades luftflödesmätarna för luftningsbassängerna och resultatet visade på att nuvarande mätning var korrekt. Även gasmotorns flödesmätare kontrollerades och även den mätningen var korrekt (Stark Fujii, 2015). Därmed kan resultaten från luftflödesmätarna antas vara korrekta vid evaluering av energiåtgången för reningen av ammoniumkväve.

2.5.1 Referenslinjen

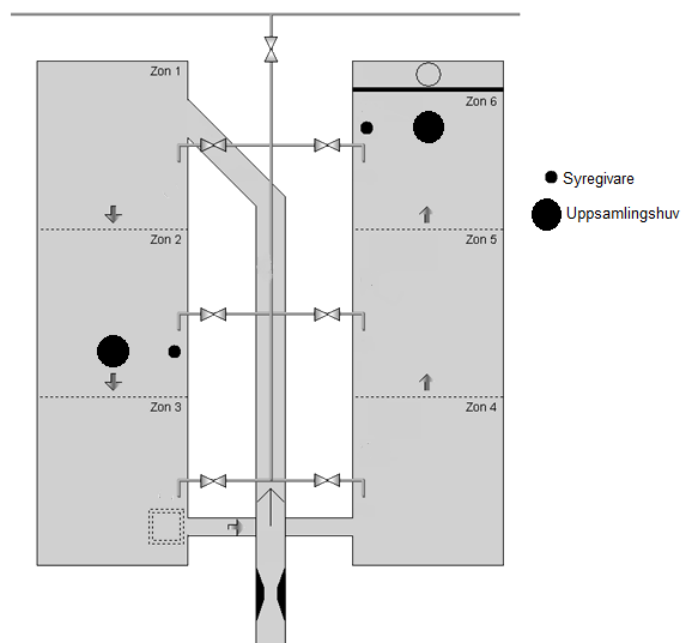
Referenslinjen (Linje 6) styrs med ordinarie reglering och består av två syregivare i zon 2 och 6 (Figur 9). Regleringen baseras på syregivaren i zon 2 och syrebörvärdet är 2,0 mg/l vid ordinarie drift. Syregivaren i zon 6 är inte med i regleringen utan används endast som övervakning av processen. Vid förekommande störningar i processen har syrebörvärdet höjts till cirka 4 mg/l under kortare perioder.



Figur 9. Referenslinjen (Linje 6) med flödespilar och placering av syregivare.

2.5.2 Alphameterlinjen

Alphameterlinjen (Linje 7) består av kontrollenheten och två huvar som är placerade i zon 2 och 6 där också syregivarna finns placerade (Figur 10). Alphametern är överordnad luftflödesregulatorn och ger den ett börvärde som i sin tur reglerar luftventilens öppningsgrad. Vid zon 6 sitter det också en ammoniumgivare.



Figur 10. Alphameterlinjen (Linje 7) med placering av huvar och syregivare.

varje zon. MCP:en skickar signalen till luftventilerna för varje bassäng. Justeringen av öppningsgraden av varje ventil görs också via MCP:en.

Terassa avloppsreningsverk kunde ge följande resultat efter några månader med det nya reglersystemet.

- Syrehaltsgivaren visade endast en variation på +/- 0,2 mg/l under 95 % av processtiden.
- 70 % av det totala syrebehovet användes i första delen av bassängen.
- α varierade mellan 0,38-0,45 i zon 1 och 0,55-0,65 i zon 2.

Från dessa resultat visades att det krävdes cirka 33 % mer luftning i första delen av bassängen för att uppnå samma syrehalt som i andra delen av bassängen. Genom det styrdes regleringen om för att upp till 40 % av det totala syrebehovet skulle tillfredsställas i den senare delen av bassängen. Detta gjordes genom att sänka syrebörvärdet i den första delen av bassängen.

En simultan sänkning av syrebörvärdena skedde i både första och senare delen av bassängen till en gräns där processen fortfarande presterade enligt kraven. Vid en sänkning till 0,5 mg/l i zon 1 kunde en instabilitet och ett syrebehov över de 40 % av de totala syrebehoven i zon 2 uppvisas. Processen fungerade väl så länge syrebörvärdet i zon 1 inte undergick 0,5 mg/l och värdet i zon 2 var större än 0,9 mg/l.

Genom det resultatet körs nu verket med ett syrebörvärde i zon 1 på 0,8 mg/l och 1,0 mg/l i zon 2 och det utan några negativa effekter på processen. Målet för både kväve och organiskt material uppnås under dessa förhållanden. Lufttrycket kunde också sänkas till 0,52 bar.

Implementering av realtidsmätningar i styrsystemet för OUR, OTE och AlfaF samt nya processtrategier gav följande resultat:

- Minskad varians på syrehalten relativt börvärdet med +/- 0,2 mg/l under normala förhållanden.
- Reducering av börvärden för syrehalten mellan 1 till 1,2 mg/l utan negativ effekt på processen. Luftflödet kunde minskas med 10-12 % i jämförelse med den tidigare regleringen.
- Bättre fördelning av den biologiska aktiviteten längs med hela bassängen genom data från OUR. Även möjlighet att reglera mer luft till de områden där OTE är högre.
- Lägre lufttryck i systemet överlag på grund av mer balanserad luftfördelning och luftventilerna kunde hållas mer öppna.
- Den totala luftningen minskade med 15-25 % och energibesparingar kunde erhållas med 15-20 %. Detta vid en fullständig implementering av Alphamatern och därmed en syrehaltsprofil baserat på Alphamaterns beräkningar i olika zoner.

Erlangen är ett avloppsreningsverk med biologisk kväverening och en kapacitet på cirka 800 m³/h. Luftningsbassängen består av fyra parallella linjer med en anoxisk zon och tre luftade zoner per linje. Antalet dysor är homogent utspridda över hela den luftade zonen. Regleringen bestod av ett börvärde för lufttrycket för regleringen av kompressorn och individuella syregivare med PID-reglering. Börvärden för syrehaltsgivaren justerades av processoperatör.

Installation av huvarna gjordes i de två första zonerna i linje 1. Mätutrustning för att mäta luftflödet i de tre första zonerna i linje 1 installerades. Luftningen och ventilreglagen i linje 1 reglerades sedan av Alphametern. Under denna tid användes ursprungliga börvärden för syrehalten och ammoniumåterkopplingen var fortfarande aktiv.

Implementering av Alphametern i linje 1 på Erlangen avloppsreningsverk gav följande resultat:

- Stabiliteten och kontrollen i de två första zonerna i linje 1 var godkända men jämförbara med befintligt system.
- Luftflödet fördelades enligt 3:2:1 på de tre zonerna.
- OUR-värdet varierade mellan 50-70 mg/l/h i zon 1 och 15-25 mg/l/h i zon 2.
- AlfaF varierade mellan 0,6-0,8 och i zon 2 var det oftast 15-20 % högre än i zon 1.

Från vad försöken visade verkar det som att den största biologiska aktiviteten sker i zon 1. Genom att sänka börvärdet för syrehalten i zon 1 och höja i zon 2 kunde en bättre fördelning av luftningen erhållas. Proportionerna i luftflödet ändras då till 4:3:2 i de tre zonerna och OUR minskades till 40-50 mg/l/h i zon 1 och ökade till 20-30 mg/l/h i zon 2. På det sätt kunde en mer balanserad ventilöppning ske inom alla zoner. Det skulle kunna sänka lufttrycket i linje 1 om inte lufttrycket var överordnat för alla linjer.

Ytterligare fördel med Alphameter var att en mindre mängd luft nu kan bidra till samma nettohöjning i syrehalten. Det beror på att i zon 2 var alfaF högre och därmed krävs en mindre mängd luft för att uppnå samma nettoflöde av syre till processen relativt zon 1 där alfaF-värdet var lägre (d.v.s. svårare att rena vattnet). Genom implementering av Alphametern i luftningsbassängen har luftningsenergin minskat med 10 % jämfört med tidigare energianvändning.

2.6.2 Information om membranens tillstånd

Schuchardt et al. (2007) menar att det är fördelaktigt att använda off-gas metoden då den ger en överblick över luftningens begränsningar och insikt i processen i luftningsbassängen. Deras undersökning i Tysklands näst största avloppsreningsverk använde mätningar i varje zon i luftningsbassängen. Studien visade i de tre zonerna som mättes att det var skillnader i α SOTE (från 15-24 %) och att vid låga inflöden var också α SOTE som högst och vice versa. Syreupptagningshastigheten (α SOTR) var relativt

konstant i början på bassängen (zon 1). Eftersom dygnsvärdet för α SOTE är relativt lika för varje dag (vid torrt väder, ungefär samma inflöde, temperatur och biomassa koncentration) kan off-gas utrustningen ge indikationer på tillståndet på membran och inga onödiga ingrepp behöver göras på bassängen med påföljande avbrott i produktion. Gori et al. (2014) visade att α SOTE minskade från 18 till 9,5 % under en 2-års period utan rengöring av dysorna. Mätningarna kan därmed underlätta planering av underhåll av luftningsbassängen och därmed minska energibehovet och driftkostnaden.

2.6.3 Tidigare fullskaleförsök på Himmerfjärdsverket

Det har tidigare bedrivits fullskaleförsök på Himmerfjärdsverket för att förbättra och energieffektivisera luftningssteget. Undersökningar har gjorts vid tre olika examensarbeten som har varit en del i ett doktorandprojekt på IVL, genomfört av Linda Åmand. Forskningsprojektets mål var att undersöka möjligheten till minskad energiförbrukning i luftningsprocessen med hjälp av reglerteknik. Resultatet från Himmerfjärdsverket visar på att skillnaden i luftflöde mellan en linje med ammoniumåterkoppling och linje med konstanta syrehalter var cirka 15 % (Åmand, 2015).

Ett examensarbete under 2011 visade att de olika referenslinjerna har alla olika syreprofiler och belastningen varierar över dygnet, med störst belastning nattetid. Genom zonvis reglering av luftningen kunde syretopparna minskas. Vid hög belastning kunde dock inte försökslinjen rena allt ammonium trots att ventilerna till luftningen var öppna till 100 %. Vid installation av flödesgivare till luftning i varje zon kan ett tryckfall uppstå vilket förklarar att reningen inte uppfylls under hög belastning. Med zonvis reglering kan en energibesparing erhållas med cirka 10 % jämfört med ursprunglig reglering (Åfeldt, 2011). Under vårtermin 2012 utfördes ett annat examensarbete med försök i fullskala med snabb ammoniumåterkoppling och konstanta syrenivåer. Resultatet från dessa försök visar att konstanta syrenivåer (14 Wh/kg NH₄) med stigande syrehaltsprofil är mer energieffektivt med avseende på både reningsgrad och energiförbrukning än både ammoniumåterkoppling (22 Wh/kg NH₄) och ursprunglig reglering (21 Wh/kg NH₄)(Wiig, 2012).

Ytterligare ett examensarbete utfördes under vårterminen 2012 där det undersöktes hur en långsam ammoniumåterkoppling och zonvis reglering av luftningen på en av linjerna skulle inverka på energiåtgången och reningen. Resultaten visar på att det finns potential för en minskad energiåtgång på 16 % vid implementering av långsam ammoniumåterkoppling i alla linjer. Även en stigande syrehaltprofil utnyttjade mindre energi i form av luftning än ursprunglig reglering. Det kunde fastslås att en stigande syreprofil är att föredra framför jämn och minskad syreprofil. En stigande syreprofil minskade syretopparna i slutet av den luftade bassängen. Eftersom försöken för de två olika reglerstrategierna endast varade under två veckor är det svårt att dra några slutsatser hur de undersökta reglerstrategierna skulle fungera under en längre period i förhållande till ursprunglig reglering. Rapporten tar också upp att luftningen i vissa zoner inte var möjlig att reglera vid hög belastning då ventilläget snabbt nådde 100 %.

En ökning av luftningskapaciteten skulle behövas för att kunna reglera luftningen vid höga belastningstoppar (Andersson, 2012).

3. Metod

För att undersöka Alphameterns möjlighet till minskad luftning och dess möjlighet till förbättrad processövervakning på Himmerfjärdsverket har flera steg utförts.

3.1 Förberedande arbete

För att resultaten under perioden skulle vara jämförbara mellan de två utvärderingslinjerna var det viktigt att belastningen och förhållandena in till respektive utvärderingslinje var lika. Detta uppnåddes genom att reglera inflödet till de två undersökta linjerna (Linje 6 och 7) via de luckor som finns i inloppet till luftningsbassängerna. Eftersom linje 6:s lucka hade rostat fast valdes att sänka linje 7:s lucka tills samma vattennivå erhöles i vattenkanalen in till luftningsbassängen. Kontroll av vattennivån gjordes via sensorer som sitter några meter in på kanalen som leder vattnet till luftningsbassängen.

Manuell mätning med tumstock utfördes vid högt och lågt flöde för att kontrollera att onlinegivarna för vattennivån vid inflödet till respektive linje var korrekt. Mätningarna stämde överens med onlinegivarens data för både högt och lågt flöde. Eftersom onlinegivarna visar korrekta värden och genom att anta att flödes hastigheten till respektive linje var densamma kunde onlinemätningarna användas för att beräkna den procentuella fördelningen av totalflödet till respektive linje (Appendix E).

Eftersom membran kan sättas igen av slammet utförs så kallad motionering där alla luftventiler in till bassängen stängs för att senare snabbt öppnas när lufttrycket har ökat i ledningarna. Vid ordinarie drift utförs motionering en gång i månaden. Det ger ett kraftigt luftflöde över membranen samtidigt som membranen trycks ihop och utvidgar sig under en kort stund vilket kan ta bort eventuellt slam som har fastnat i de små hålen på membranen. Motionering utfördes på linje 6 och linje 7 på morgonen fredagen den 20 november för att samma förhållanden skulle råda under utvärderingen.

3.2 Förutsättningar

I alla linjer användes stegbeskickning till luftningsbassängen i både zon 1 och 2. De manuella ventilerna till respektive zon hade samma inställning på Alphameterlinjen och referenslinjen. Alla zoner hade sina ventiler öppna till 100 %. Syre- och ammoniumgivarna i linje 6 och 7 rengjordes manuellt 1 gång varannan vecka för att undvika igensättning. Motionering av membranen utfördes inte under försökets gång, vilket vanligtvis sker en gång i månaden.

3.3 Provtagning

Dygnsprovtagare placerades ut i slutet av eftersedimenteringen på linje 6 och 7. Från dygnsprovtagaren analyserades dygnsmedelhalten av ammoniumkväve och totalt organiskt kol (TOC). TOC analyserades för att få en bild över skillnaden i mängden organiskt material i inkommande och utgående vatten och därmed ett mått på belastningen. För att få möjlighet att följa förändringarna över dygnet installerades en online ammoniumgivare i Alphameterlinjen. Givaren placerades bredvid befintlig syregivare i utloppet (zon 6) i linje 6. I kanalen innan vattnet delar upp sig på de 8 luftningslinjerna analyserades dygnsmedelvärden för ammoniumkväve och TOC med en dygnsprovtagare. Dygnsmedelvärden för ammoniumkväve och TOC analyserades i labbet på Himmerfjärdsverket. Dygnsprovtagaren programmerades för att ta ett vattenprov på 6 ml var 6:e min under hela dygnet. Vattenproverna samlades upp i en dunk där vattnet senare kunde hämtas för att analyseras en gång per dygn (Figur 12). Under helger gjordes ett samlingsprov för fredag till söndag.



Figur 12. Uppställning av provtagningskåp i slutet på eftersedimenteringen med slang i utloppskanalen och bild inifrån skåpet med provtagare och uppsamlingshink.

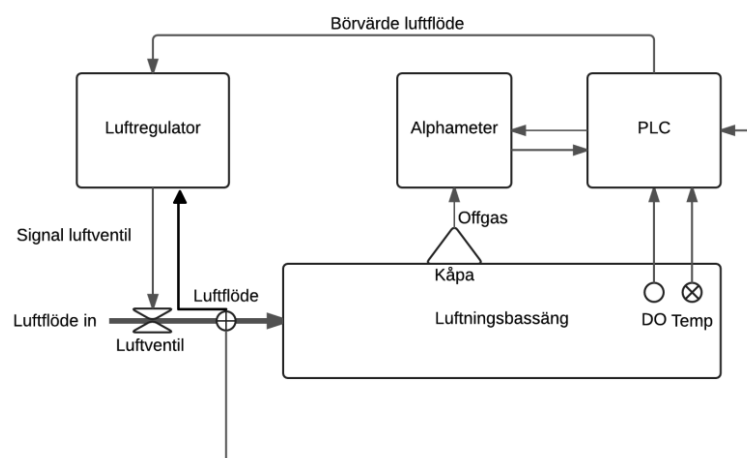
3.4 Installation av Alphameter

Alphameterutrustningen installerades i linje 7 på Himmerfjärdsverket (Figur 13). Tillhörande huvar placerades i zon 2 och 6 där befintliga syregivare var placerade. Skåpet placerades i närhet till zon 2 där skåpet borrades fast i betongen. Luftslangar installerades från både huv 1 och 2 och kopplades in till skåpet. För att kunna sänka ner huven till vattenytan installerades rep i de befintliga öglorna som sitter i ytterkant på huven. Repen hade också funktionen att hålla huven på plats i det vågräta planet. Speciellt vid huv 1 fanns kraftiga vattenrörelser på grund av större luftflöde i den delen av bassängen.



Figur 13. Alphametern och båda huvarna i zon 2 och zon 6 installerade i linje 7 på Himmerfjärdsverket, Syvab.

För att Alphametern skulle kunna kommunicera med det befintliga styrsystemet installerades ett profibuskort i Alphametern. Kommunikation skedde sedan med profibuskabel framdragen från PLC-systemet. I Alphametern fanns möjlighet att externt koppla till syregivare, luftflödesmätare och temperaturmätare eller välja att skicka dessa signaler från befintlig utrustning. I detta fall programmerades den nuvarande PLC:en för att skicka data om luftflödet, syrehalten och vattentemperaturen till Alphametern. Data om vattentemperaturen hämtades från befintlig temperaturmätare vid utgående vatten. Alphametern skickade i sin tur ett luftbörvärde till PLC:en som skickade värdet till befintlig luftflödesregulator, vilket justerade öppningsgraden hos luftventilen (Figur 14).



Figur 14. En principskiss över regleringsstrukturen med Alphametern installerad i linje 7 på Himmerfjärdsverket.

Eftersom det fanns två huvar var det möjligt att välja vilken av huvarna som skulle reglera luftflödet. I detta försök användes huv 1, i zon 2, som styrande huv eftersom luftflödet i de andra linjerna reglerades utifrån zon 2.

Alphametern kräver att operatören anger vissa platsspecifika värden (Tabell 5). Dessa värden matades manuellt in i Alphametern.

Tabell 5. Platsspecifika värden för Himmerfjärdsverket som används av Alphametern för både zon 2 (huv 1) och zon 6 (huv 2)

Värde	Symbol	Kvantifiering	Beskrivning
Lufttryck på plats	P_b	101,2 kPa	Gäller för 8 m.ö.h.
Tankvolym	V_t	2710 m ³	Gäller för hela bassängen
Neddopningsdjup	$Subm_{diff}$	4,75 m	Djup ned till överkant membran
Antal membran	Qty_{diff}	1329 st	Gäller för hela bassängen
Mättnadskonc. O₂ 20°C	DO_{f20}	10,6575 mg/l	$DO_{f20}=9,09+0,33 \times Subm_{diff}$
Beta	β	0,96	$\beta = 1 - 0.01(TDS)/1000$ där TDS=Total Dissolved Solids
Konstanter	A_{SOTE}	A= 0,0026	Konstanterna fås genom att göra en 2:a grads anpassning av regressionslinjen för SOTE vs. luftflöde per timme och membran för den specifika luftningsbassängen och dess membran
	B_{SOTE}	B= - 0,0335	
	C_{SOTE}	C= 0,4007	

Den 17/11-2015 installerades skumgummikanaler runt slangen från huv 1 för att undvika att kondensvattnet skulle frysa till is och blockera luftflödet. Blockeringen skulle innebära att ingen analys av off-gas skulle kunna göras och regleringen av luftningsprocessen skulle stanna av. För luftslangen från huv 2 installerades ingen isolering runt luftslangen då sträckan var betydligt längre än från huv 1 och ingen tillgång till material fanns. Det var också viktigare att huv 1 kunde leverera off-gas eftersom den ingick i regleringen av luftningen.

Mellan varje analysomgång för respektive huv används 1-2 min för kalibrering med utomhusluft. Kalibrering gjordes på plats med rattreglage för att uppnå 20,9 volymprocent syre och 0,04 volymprocent koldioxid under kalibreringsperioden. Eventuella efterjusteringar kan behöva göras efter en viss period för att säkerhetsställa att analysen av syre och koldioxid är korrekt.

Datainsamlingen från Alphametern gjorde i Syvabs datainsamlingsprogram, NXW. I NXW fanns också ett reglage där processoperatören har möjlighet att ändra från konventionell reglering till Alphameterreglering.

3.5 Utvärdering av processövervakning

Ett av målen var att utvärdera om Alphameteren kunde ge en bättre processövervakning. Den utvärdering gjordes genom att redovisa vilka processparametrar som beräknades av Alphameteren och hur de varierade över dygnet och veckan. Två olika inställningar för platsspecifika värden testades (Tabell 5 och Tabell 7) för att undersöka dess påverkan på processparametrarna.

Vid installationen av Alphameteren valdes de platsspecifika värdena som Alphameteren behövde i samråd med leverantören, Invent. Eftersom det inte fanns möjlighet att reglera luftflöde zonvis valdes att ange platspecifika värden som gällde för hela luftningsbassängen (Tabell 5). Detta ger en generell bild av processparametrarna och för att få en mer korrekt bild av processen krävdes information om exakt luftflöde till varje zon. Eftersom det endast finns en huvudventil och en luftflödesmätare för hela linjen var detta inte möjligt. Anvisningar och installationsförfaranden baserades främst på leverantören och utvärderingen med avseende på förbättrad reglering bygger på denna information och dessa inställningar.

Resultatet från mätningarna redovisas för vecka 47 (16/11/2015-22/11/2015) (Tabell 10). Eftersom trenderna och mätvärden inte skiljde sig under hela projektets gång var vecka 47 representativt för hela utvärderingsperioden. Under början på veckan var gasmotorn avstängd för reparation och gasmotorn startades igen på tisdagen den 17/11 kl: 09:30. Detta gav stora utslag på luftflödet (Figur 20) och därför var också vecka 47 intressant att studera med avseende på förändringarna på processparametrarna under stora luftflödesförändringar.

Efter att processparametrarna (OTE, SOTE, AlfaF, OUR, OTR) var loggade för vecka 47 ändrades de platspecifika värdena från att representera hela linje 7 (Tabell 5) till att representera endast zon 2 i linje 7 (Tabell 7). För att kunna beräkna luftflödet till zon 2 antogs att luftflödet genom varje membran var lika. Den procentuella fördelningen av membran i de olika zonerna, membrankvoten, togs fram (Tabell 6).

Tabell 6. Antalet membran i varje zon (1-6) i linje 7 och den procentuella fördelningen av membranen över alla zonerna

Zon	Antal membran	Membrankvot (%)
1	343	26
2	295	22
3	222	17
4	185	14
5	149	11
6	135	10
Totalt	1329	100

Genom att multiplicera membrankvoten för zon 2 med ingående luftflödet till linjen erhöles ingående luftflöde till zon 2. Ändringarna gjordes den 1/12/2015 mellan kl 09:30 och 13:00. Först ändrades inställningarna i Alphametern och sen ändrades insignalen för luftflödet till den bestämda kvoten för zon 2, det vill säga 22 % av totala luftflödet till linje 7.

Eftersom regressionsanalysen på SOTE vs. luftflöde per timme och membran gällde för hela bassängen beräknades konstanterna (A, B och C), för zon 2 (Tabell 7 och Appendix C). Det fanns också sedan tidigare ett felaktigt värde på Beta angivet av leverantörer, vilket ändrades till det korrekta generella värdet (Tabell 7).

Tabell 7. De ändrade platsspecifika värdena som användes av Alphametern för zon 2 (huv 1) i linje 7

Värde	Symbol	Kvantifiering	Beskrivning
Tankvolym	V_t	452 m ³	Gäller för zon 2
Antal membran	Qty_{diff}	295 st	Gäller för zon 2
Beta	β	0,98	$\beta = 1 - 0.01(TDS)/1000$
Konstanter	A_{SOTE}	A= 0,0026	Gäller för zon 2, se appendix C
	B_{SOTE}	B= - 0,0334	
	C_{SOTE}	C= 0,4034	

För utvärdering av processövervakningen togs tillfälligt höga eller låga värden inte med i beräkningarna. Beräkningen baserades på värden under normaldrift och där inga störningar har förekommit. Beräkningarna baserades på ett nytt mätvärde var 10:e min.

3.6 Utvärdering av reglering

En hypotes var att Alphametern skulle ge en förbättrad reglering av processen och därmed minskad energiförbrukning för luftningen. Genom att anta att koncentrationen av ammoniumkväve är homogen i inkommande vatten och att flödes hastigheten in till respektive luftningsbassäng är lika kan mängden kväve som omvandlas per linje beräknas. Analys utfördes på mängden luft per kilo omvandlad ammoniumkväve i linje 6 (referenslinje) och linje 7 (Alphameterlinje) under samma period.

För utvärderingen användes intervalltid för off-gas analys på 10 min (GAS) och åtgärds tid för syrehaltsdifferensen på 15 min (DO_{diff}) samt 10 min mellan beräkning av syrehalten mellan gasanalyserna, under icke jämvikt (NSS). Ett medelvärde av de 2 senaste minutvärdena från syregivaren skickades till Alphametern.

Energiförbrukningen i Alphameterlinjen (linje 7) skulle jämföras mot en linje som regleras av ammoniumåterkoppling (linje 3) och en linje med ordinarie reglering (linje 6). Under sommaren år 2015 var linje 3 avstängd för underhåll. Efter uppstart av linje 3 uppvisades dåliga reningsresultat i hela block A (linje 1-4) och därmed valdes att stänga ner linje 3. Det innebar att ammoniumåterkopplingen inte längre kunde ingå i

utvärderingen. Alphametern jämfördes istället mot ordinarie reglering i linje 6 under period 1 och sedan jämfördes linje 7:s ordinarie reglering under period 2 mot linje 6:s ordinarie reglering under samma period (Tabell 8).

Tabell 8. Redovisning av vilken typ av reglering som gällde i respektive linje under respektive period

Period	Datum	Dagar	Linje 6	Linje 7	Syrebörvärde (mg/l)
1	20/11-26/11 2015	7	Ordinarie	Alphameter	2,0
2	30/11-5/11 2015	7	Ordinarie	Ordinarie	2,0

Målet med att utvärdera linje 7 och 6 med ordinarie reglering var att se om det fanns ursprungliga skillnader mellan linjerna med avseende på reningseffektivitet. Huven som var placerad i zon 2 användes för att reglera luftningen och huven i zon 6 användes endast för övervakning av processen.

För att undersöka om belastningen var densamma till båda linjerna fanns intresse att analysera COD på ingående och utgående vatten. Tyvärr fanns inte den möjligheten på verkets laboratorium och kostnaden för analyser på externt laboratorium skulle bli för stor för projektets budget. Därmed valdes att analysera TOC på in- och utgående vatten från de undersökta luftningsbassängerna som ett mått på belastning. Eftersom Alphametern använder sig av ett syrebörvärde för att reglera luftflödet användes samma syrebörvärde (2,0 mg/l) i linje 6 för att linjerna skulle vara jämförbara.

Genom analys av inkommande mängd ammoniumkväve till luftningsbassängerna och utgående mängd från eftersedimenteringen i respektive linje kunde mängden ammoniumkväve som omvandlades per linje erhållas. För att undersöka energiåtgången mellan de olika linjerna loggades luftflödet in till respektive linje.

För att beräkna vattenflödet till varje linje gjordes antagandet att flödes hastigheten var lika i alla linjer. Kvoten mellan respektive linjes vattennivå i ingående kanal och den sammanlagda vattennivån i alla kanaler gav fördelningen av flödet genom att kvoten multiplicerades med totalflöde (Appendix E). Flödet till respektive linje multiplicerades med in- och utgående koncentrationer av $\text{NH}_4\text{-N}$ och TOC vilket gav antalet kilo per dygn (in- och utgående) av respektive ämne. Genom att använda data om totalt luftflöde per dygn och mängd omvandlad ammoniumkväve per dygn kunde mängden luft per omvandlad mängd ammoniumkväve beräknas. Under utvärderingsperioden användes ett medelvärde för helgperioden (fre-sön) eftersom inga vattenprover analyseras under helgtid (Appendix B). För att undersöka energibehovet för elblåsmaskinerna togs en ekvation fram (Appendix F). Mängden energi som elblåsmaskinerna använde beräknades enligt

$$P = 0,02 \times Q_{Luft} + m \quad (23)$$

där P (kW) är den totala effekten av alla blåsmaskiner, Q_{Luft} (Nm³/h) är luftflöde till respektive linje och m är interceptet. Eftersom det är skillnaderna mellan linjerna som är intressant har interceptet inte använts i beräkningarna (Appendix E).

Syregivaren visade större oscillationer i linje 7 än övriga linjer i block B och därför valdes att flytta syregivaren cirka 1 dm för att undvika att den låg mitt i ett område där luftbubblorna gick samman. Den åtgärden minskade oscillationerna till en liten grad. För att ytterligare minska oscillationerna byttes membranet på syregivaren i zon 2, linje 7. Genom att också använda ett medelvärde på 6 min för syrehalten i bassängen kunde det oscillerande luftbörvärdet minskas. Värdet ändrades till utvärderingen till 2 min medelvärde då 6 min gav en fördröjningsfaktor som gjorde det svårt för Alphameteren att reglera processen.

Reglerinställningar som testades från början var ett syrebörvärde på 2,0 mg/l, gasanalysintervall på 10 min (GAS), tid för åtgärd för korrektion av syrehaltsdifferensen på 10 min (DO_{diff}) och tiden som användes för att kontrollera syrehaltsförändringen mellan gasanalyserna var 5 min (NSS). Ett medelvärde av de 6 senaste minuternas syrehalt skickades till Alphameteren. Testet varade under ett dygn och data loggades varje minut. Funktionen för automatisk rengöring av syrehaltsgivaren kopplades bort för att undvika toppar i mätningarna. Syregivaren rengjordes istället manuellt varannan vecka.

Efter första dygnet justerades reglerinställningarna till 5 min på både DO_{diff}, NSS och GAS. Mellan försöken hade trycket i kollektorn som förser bassängerna med luft höjts till 59 kPa, vilket innebar ett högre luftflöde. På grund av problem med att inställningarna ändrades av sig själva under försöket testades endast tre olika inställningar och inställning 3 användes under utvärderingen (Tabell 9).

Tabell 9. Inställningar för GAS, DO_{diff}, NSS, DO för Alphameteren samt börvärde för elmotorerna under försöken för att hitta en bra reglering av processen

	GAS (min)	DO _{diff} (min)	NSS (min)	DO _{sp} (mg/l)	Elmotorernas Börvärde (kPa)
Inställning 1	10	10	5	2,0	58
Inställning 2	5	5	5	2,0	59
Inställning 3	10	15	10	2,0	59

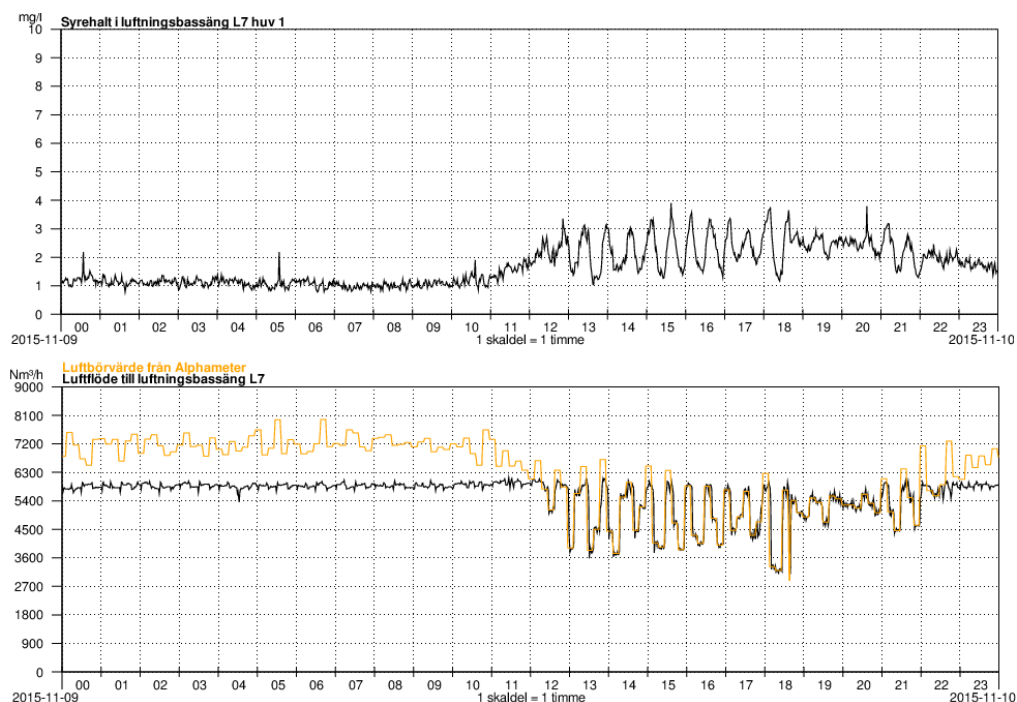
För att utvärdera hur Alphameteren reglerar syrehalten kring börvärdet användes data för måndag till torsdag mellan klockan 12:00-21:00. Under den perioden var belastningen till verket lägre och luftningssystemet klarade därmed av att tillsätta den luftmängd som efterfrågades av respektive regulator. Analysen gjordes endast på måndag till torsdag då fredagar och helgdagarna inte har samma tidsperiod för när reglering av luftflödet är möjligt.

4. Resultat

Här redovisas resultaten från fullskaleförsöken med Alphametern i linje 7 på Himmerfjärdsverket.

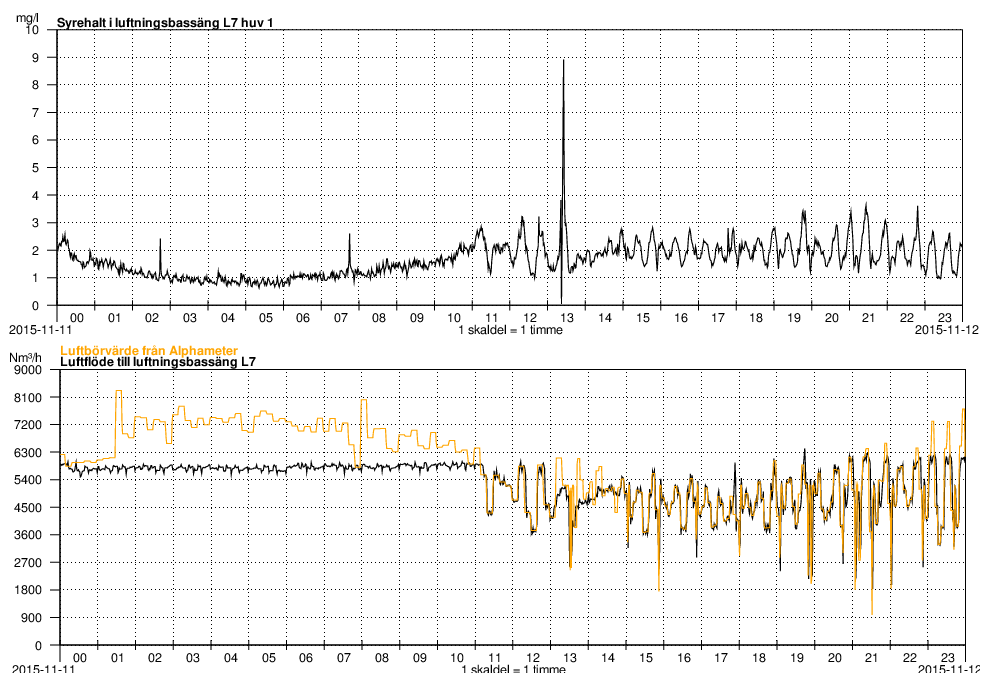
4.1 Inställning av reglerparametrar

Inställning 1 (Tabell 9) gjorde att luftflödet och syrehalten i linje 7 varierade kraftigt under de perioder då luftflödet inte var maximalt (Figur 15). Vid maximalt luftflöde var syrehalten cirka 1 mg/l lägre än syrebörvärdet på 2,0 mg/l och variationerna på syrehalten var mindre.



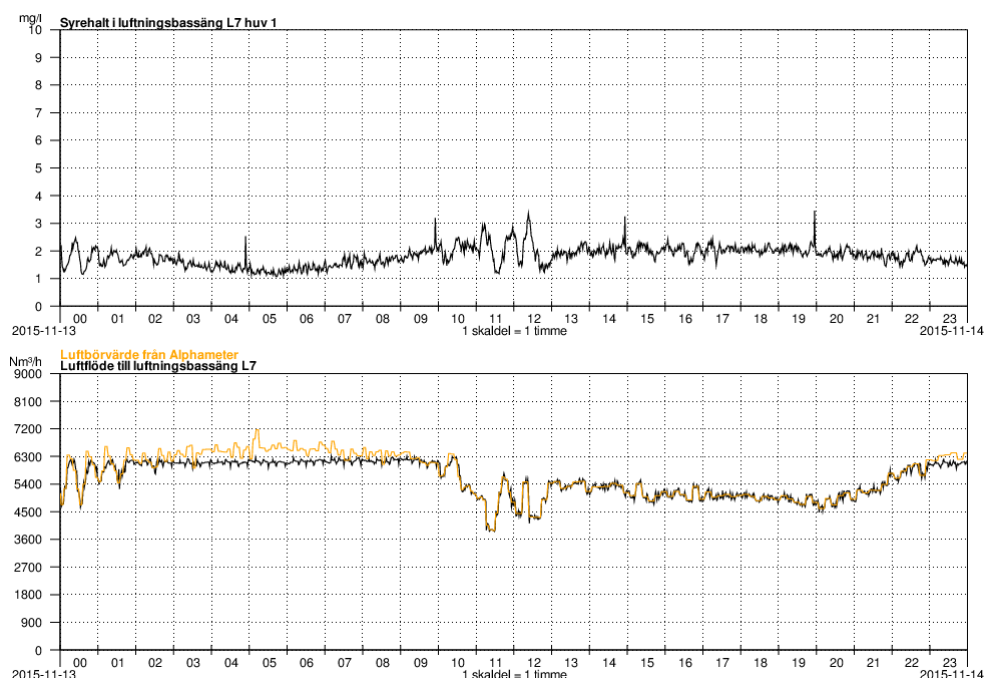
Figur 15. Den övre grafen visar syrehalten i luftningsbassängen i linje 7 och den undre visar luftbörvärdet från Alphametern och luftflödet till linje 7 under ett dygn med inställning 1. Grafen är baserad på minuttvärden.

Inställning 2 gav mindre syrehaltsvariationer än inställning 1 under perioden när luftflödet inte var maximalt (Figur 16). Förändringarna i luftflödet skedde oftare än tidigare men storleksförändringen var mindre. Syrehaltstoppen kl 13 beror på att syregivaren togs upp ur bassängen för rengöring.



Figur 16. Den övre grafen visar syrehalten i luftningsbassängen i linje 7 och den undre visar luftbörvärdet från Alphametern och luftflödet till linje 7 under ett dygn med inställning 2. Grafen är baserad på minutvärden.

Inställning 3 gav mindre variationer i syrehalten, luftbörvärdet och luftflödet (Figur 17). Luftflödet var närmare börvärdet och syrehalten hade mindre variationer än vid tidigare inställningar.



Figur 17. Den övre grafen visar syrehalten i luftningsbassängen i linje 7 vid huv 1 och den undre visar luftbörvärdet från Alphametern och luftflödet till linje 7 under 1 dygn med inställning 3. Grafen är baserad på minutvärden.

4.2 Processövervakning

Processparametrarna varierade över dygnet men trenderna för respektive parameter var lika mellan olika dagar (Tabell 10 och Figur 18).

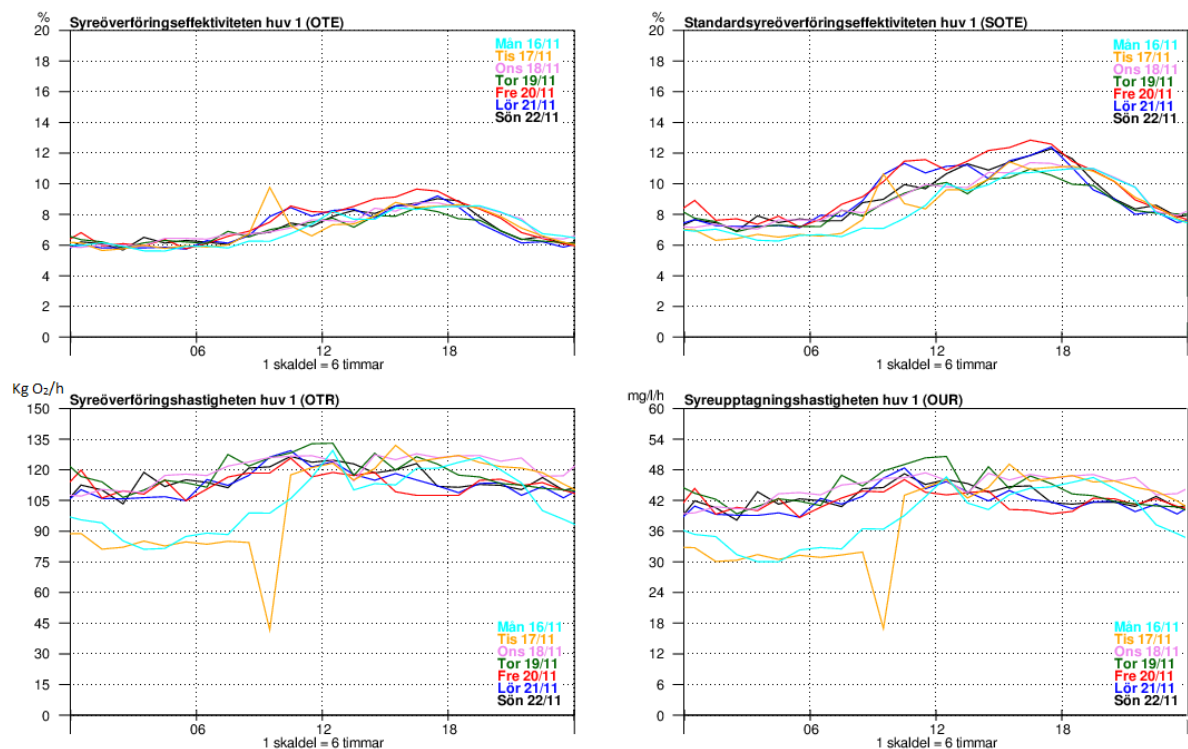
Tabell 10. Processparametrar från huv 1 under perioden 16/11-29/11 med inställningar som gällde för hela bassängen, redovisade i 10 minutsvärden

Parameter	Enhet	Min	Medel	Max	Standardavvikelse
OUR	mg/l/h	30	43	60	4
OTR	Kg O ₂ /h	85	117	158	11
OTE	%	5	7	10	1
SOTE	%	6	9	15	2
AlfaF	-	0,18	0,30	0,46	0,05

Processparametern OTE i medelvärde per timme varierade från cirka 6 % på nattetid då belastningen och luftflödet in till verket var högt till cirka 8 % under dagtid när belastningen och luftflödet var lägre (Figur 18). OTE hade inga stora förändringar under normaldrift. Eftersom SOTE baseras på OTE var trenderna för kurvorna lika. SOTE hade i medelvärde per timme ett värde på cirka 8 % under dagtid och cirka 11 % under nattetid. Vid luftflödesminskning tisdagen den 17/11 skedde en liten tillfällig ökning av OTE och SOTE (Figur 18).

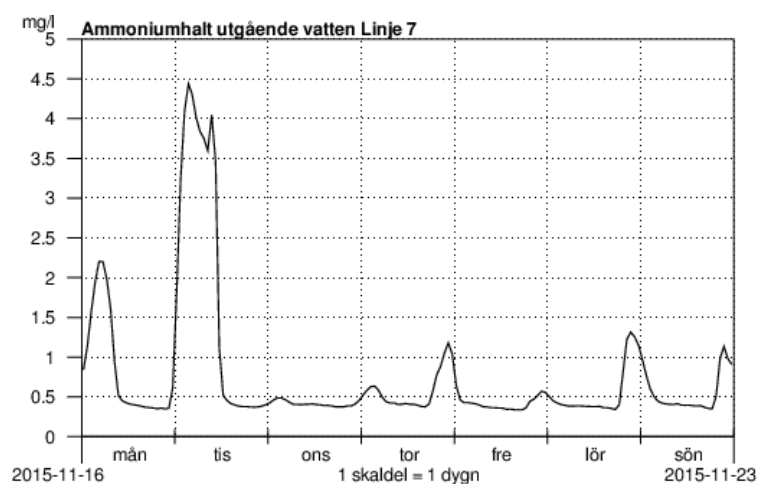
Både OTR och OUR var relativt konstanta under dygnet och veckan med lite lägre värden under nattetid. Värdet på OTR låg i medel runt 117 Kg O₂/kg för hela bassängen och värdet på OUR var i genomsnitt 43 mg/l/h. Vid luftflödesförändringen som skedde på tisdagen den 17/11 sågs direkt utslag på OTR och OUR. När OTR minskade på grund av minskat luftflöde skedde en ökning av OTE.

Under tiden när luftflödet var lägre än vanligt skedde en minskning av OTR och OUR under dygnets hårdbelastade timmar. Under dagtid när luftflödet från elmotorerna var tillräckligt skedde ingen förändring i jämförelse med de andra dagarna under vecka 47. Under måndag till tisdag kl 9 var det endast elblåsmaskinerna som tillförde luft till bassängerna och därmed var luftflödet lägre än önskat.



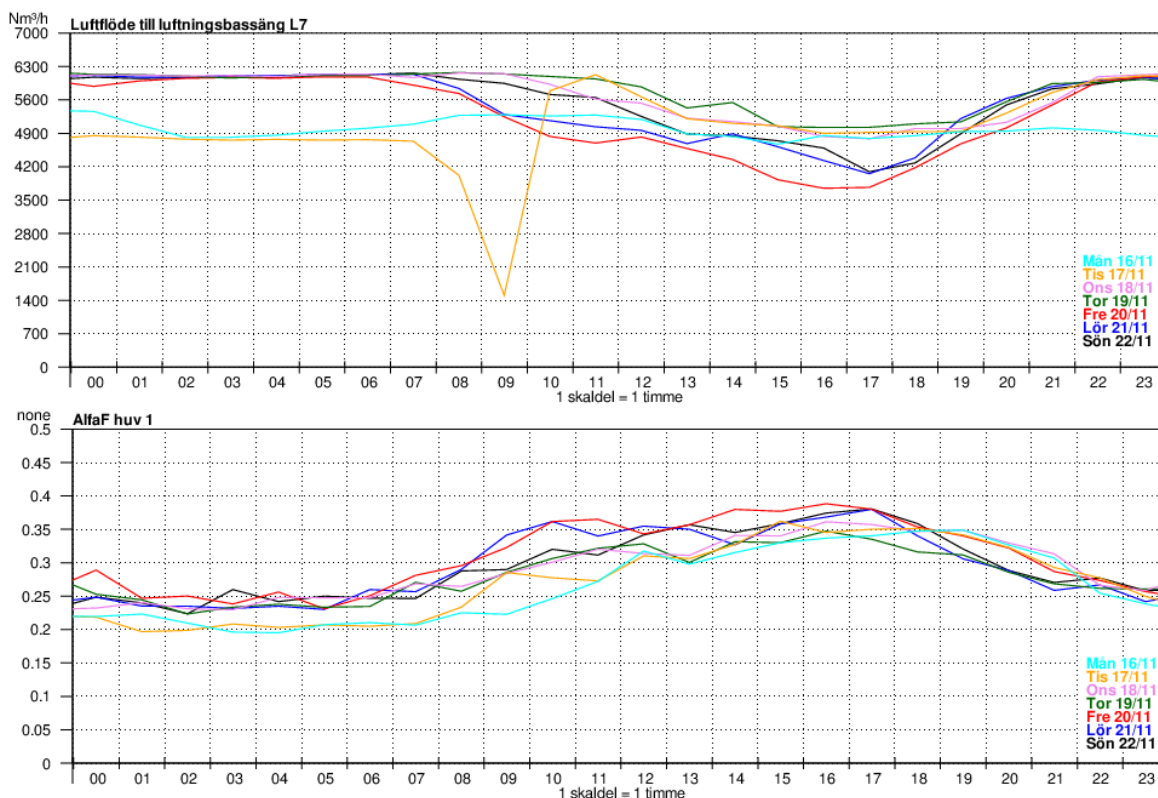
Figur 18. De processparametrar som beräknas av Alphametern under vecka 47 (16/11-22/11). Längst upp till vänster redovisas OTE, längst upp till höger redovisas SOTE, längst ner till vänster redovisas OTR och längst ner till höger redovisas OUR. Data är baserad på medelvärde per timme.

Under perioden med lägre luftflöde (måndag till tisdag kl 11) och därmed lägre värden på OTR och OUR var ammoniumhalten ut från zon 6 också högre än andra dygn under veckan (Figur 19). Ammoniumtoppen på tisdag beror på att endast elblåsmaskinerna var i bruk och de kunde inte alltid förse processen med det luftflöde som efterfrågats.



Figur 19. Ammoniumhalten i utgående vatten i linje 7 under vecka 47 (16/11-22/11). Mätningen utfördes med en online ammoniumgivare placerad i zon 6 genom loggning av värden varje minut.

AlfaF varierade under dygnet med högre värden under låg belastning och lägre värden under hög belastning (Figur 20). Värdet över de olika dagarna under vecka 47 skiljde sig inte åt förutom en aning lägre värden under perioden med endast elmotorerna i drift. Luftflödesförändringen på tisdagen berodde på uppstart av gasmotor och därmed tillfälligt avbrott i luftflödesproduktion.



Figur 20. Luftflödet till linje 7 och det beräknade AlfaF-värdet vid huv 1 (zon 2) under v.47 (16/11-22/11), redovisat i medelvärde per timme.

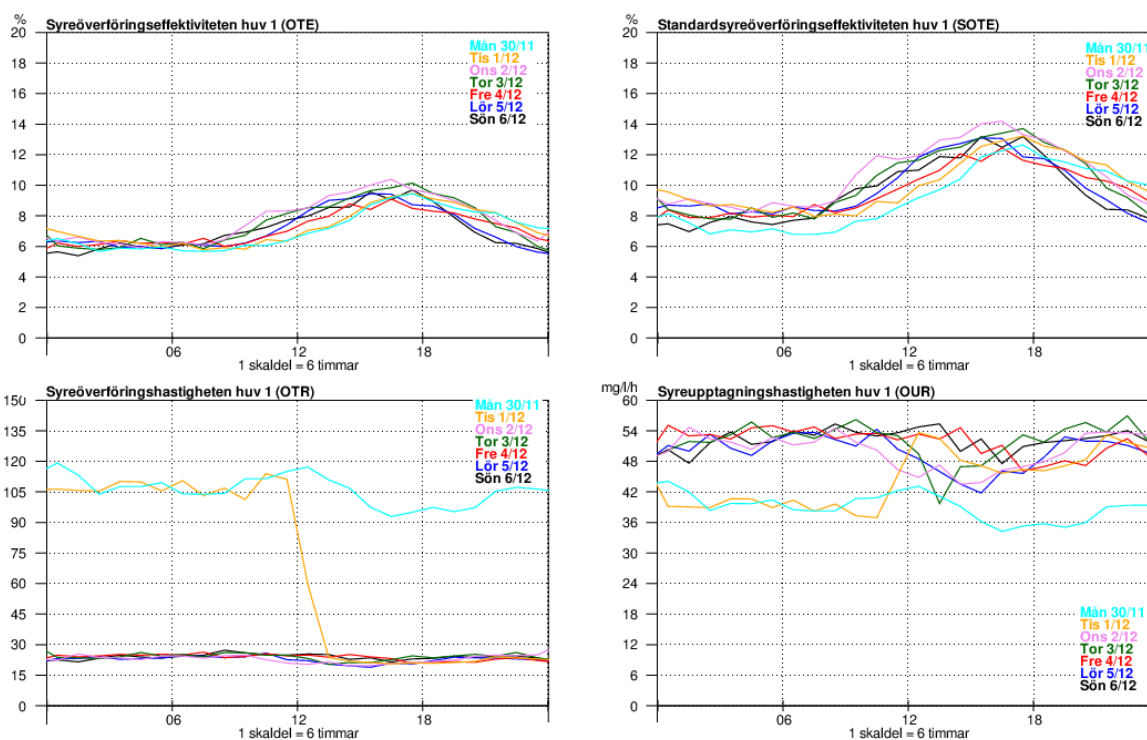
4.2.1 Justering av luftflödet och platsspecifika värden till zon 2

Med de nya inställningarna ökade OUR, SOTE och AlfaF medan OTR minskade. OTE var relativt oförändrat förutom på maxvärdet (Tabell 11).

Tabell 11. Processparametrar från zon 2 (huv 1) under perioden 2/12-6/12 med platsspecifika inställningar som gällde för zon 2 och ett luftflöde som motsvarar flödet till zon 2. Värden från inställningen som gällde för hela bassängen visas inom parantes

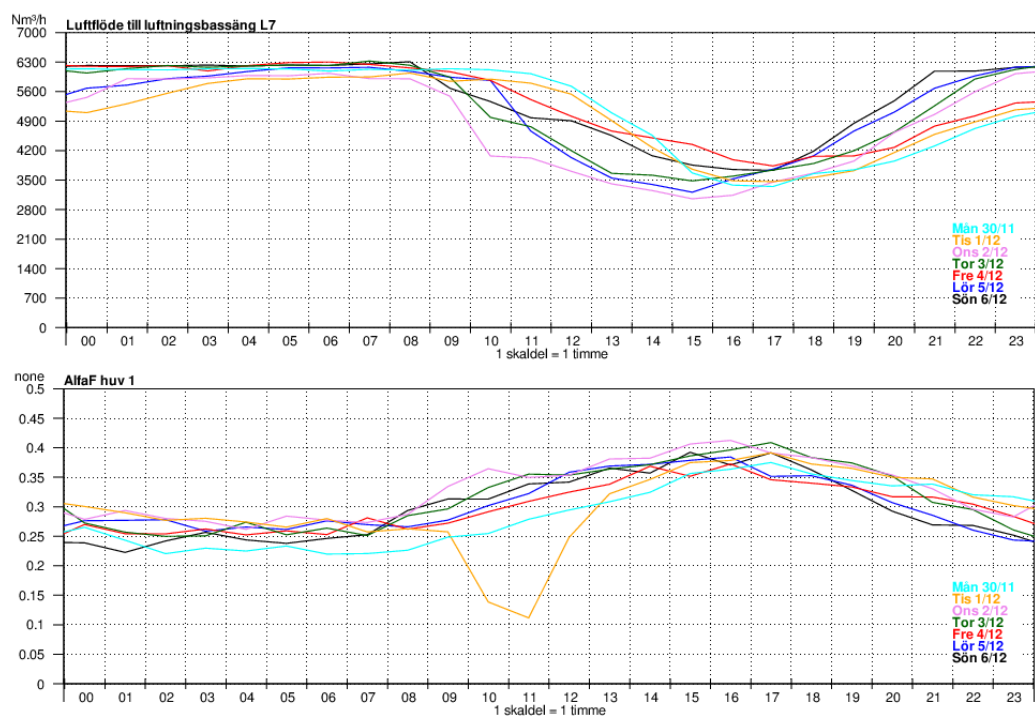
Parameter	Min		Medel		Max		Standard avvikelse	
OUR (mg/l/h)	29	(30)	52	(43)	73	(60)	4	(4)
OTR (Kg O ₂ /h)	14	(85)	23	(117)	33	(158)	2	(11)
OTE (%)	5	(5)	7	(7)	12	(10)	1	(1)
SOTE (%)	7	(6)	10	(9)	16	(15)	2	(2)
AlfaF	0,21	(0,18)	0,31	(0,30)	0,47	(0,46)	0,05	(0,05)

OTR och OUR förändrades tisdag den 1/12 när inställningarna ändrades för att gälla endast zon 2 (Tabell 7). OTE och SOTE var relativt oförändrade och följde samma trend som tidigare. OTR minskade från medelvärde på 117 kg O₂/h för hela bassängen till 23 kg O₂/h för zon 2 och variationerna var nu lägre. OUR ökade med cirka 10 mg/l i genomsnitt med lägre värden under låg belastning. Observera att under måndag 30/11 till och med tisdag 1/12 kl 12:00 gällde de tidigare inställningarna.



Figur 21. Processparametrar OTE, SOTE, OTR och OUR under perioden 30/11-6/12 med platsspecifika värden för zon 2 (huv 1) och uppskattat luftflöde för zon 2. Värden visas i medelvärden per timme.

AlfaF var i genomsnitt 0,31 och den stora förändringen på tisdagen mellan kl 9:00 och 13:00 beror på att de platsspecifika värdena ändrades utan att ändra luftflödessignalen till det korrekta luftflödet för zon 2, vilket ändrades kl 13.



Figur 22. Totalt luftflödet till linje 7 och alfaF under perioden 30/11-6/12 med platsspecifika värden för zon 2 (huv 1) och specifikt luftflöde för zon 2. Värden visas i medelvärden per timme.

4.3 Reglering

Under period 1 var belastningen och förutsättningar för både linje 6 och 7 lika med avseende på inflöde, belastning och slamålder (Tabell 12).

Tabell 12. Förhållanden och resultat för de undersökta linjerna under utvärderingsperioden. Värdena representerar dygnsmedelvärde för respektive period

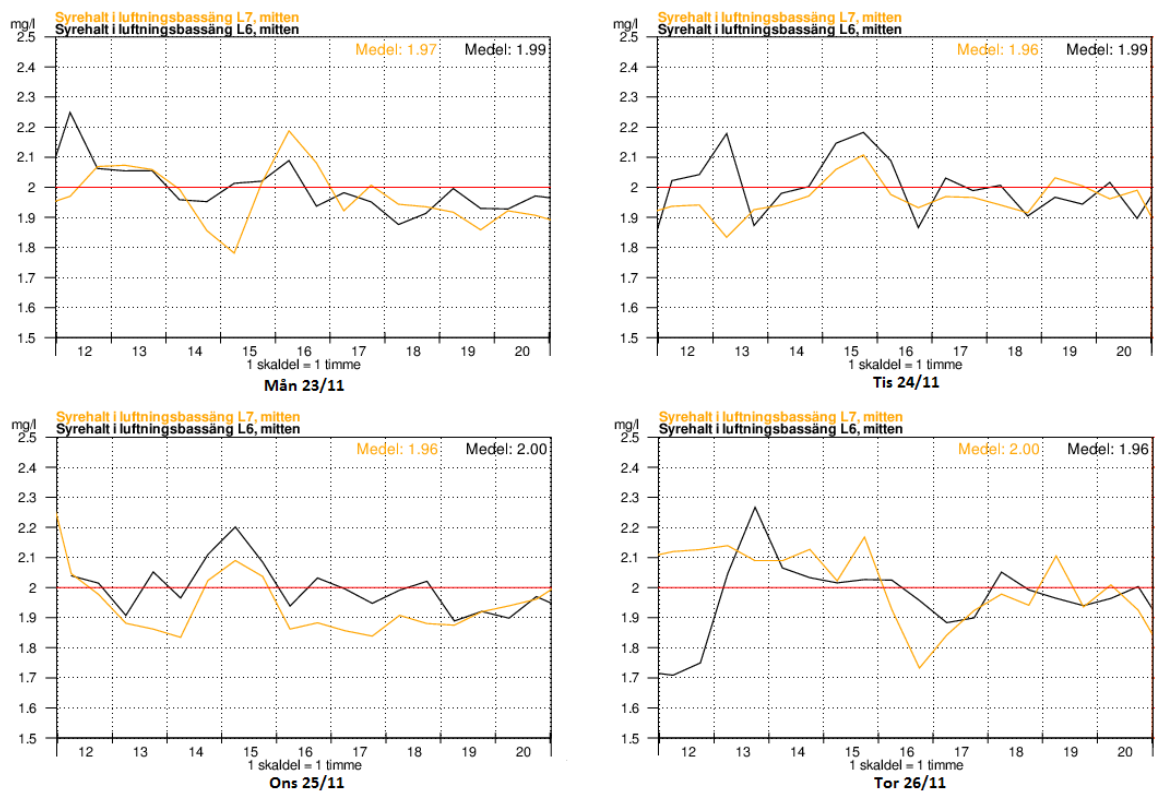
	Enhet	Linje 6	Linje 7	Linje 6	Linje 7
Reglering		Ordinarie	Alphameter	Ordinarie	Ordinarie
Period		1	1	2	2
Antal dagar		7	7	7	7
Datum		20/11-26/11	20/11-26/11	30/11-6/12	30/11-6/12
Syrebörvärde	mg/l	2,0	2,0	2,0	2,0
Vattennivå i kanal	mm	319	318	345	350
Vattenflöde	m ³ /d	15 350	15 280	16 930	17 120
Slamålder	dagar	19,9	19,4	19,4	19,6
TOC in	kg/d	668	665	621	628
TOC ut	kg/d	192	202	210	216
Reduktion	%	71	70	66	65
NH4-N in	kg/d	364	362	267	270
NH4-N ut	kg/d	3	3	2	1
Reduktion	%	99	99	99	99

Luftflödet till linje 7 var 125 Nm³/h lägre i genomsnitt än till linje 6 under utvärderingsperiod 1 (Tabell 13). Under perioden då belastningen minskade fanns skillnader mellan linjerna. Luftflödet till linje 7 minskade tidigare än linje 6 efter att luftflödet hade varit maximalt under perioden när belastningen var hög (Figur 23). När luftflödet återigen ökade efter att ha varit nere på det lägsta luftflödet för dygnet följde kurvorna varandra. Linje 7 minskade sitt luftflöde tidigare vid den sista delen av luftflödeshöjningen än linje 6.

Tabell 13. Luftflöde och syrehalt i medelvärde för linje 6 och 7 under period 1 och 2

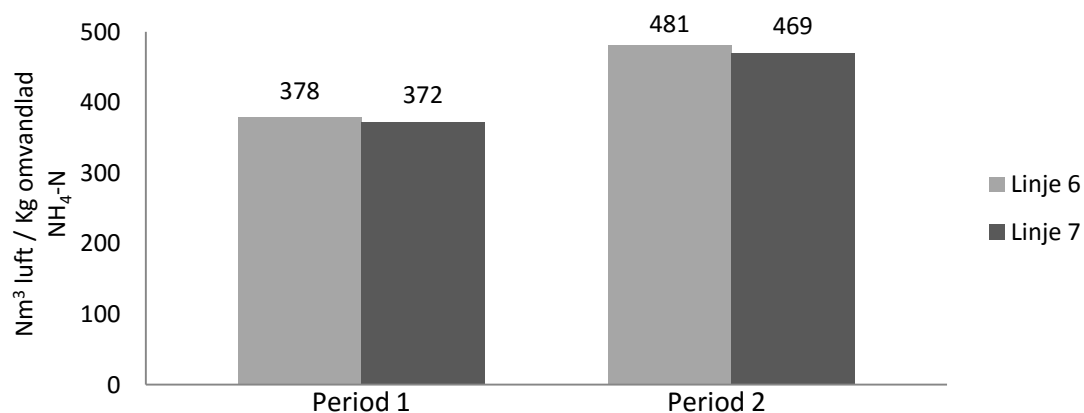
Parameter	Enhet	Period 1		Period 2	
Linje		Linje 6	Linje 7	Linje 6	Linje 7
Luftflöde	Nm ³ /h	5620	5495	5235	5152
Syrehalt	mg/l	1,62	1,70	1,81	1,85

Medelvärdet för syrehalten (zon 2) i linje 7 var under perioden 1,70 mg/l och i linje 6 var den 1,62 mg/l (Tabell 13). Linje 7 med Alphameter klarade generellt av att hålla en högre syrehalt under de perioder där syrehalten var lägre än 2,0 mg/l (Figur 23).



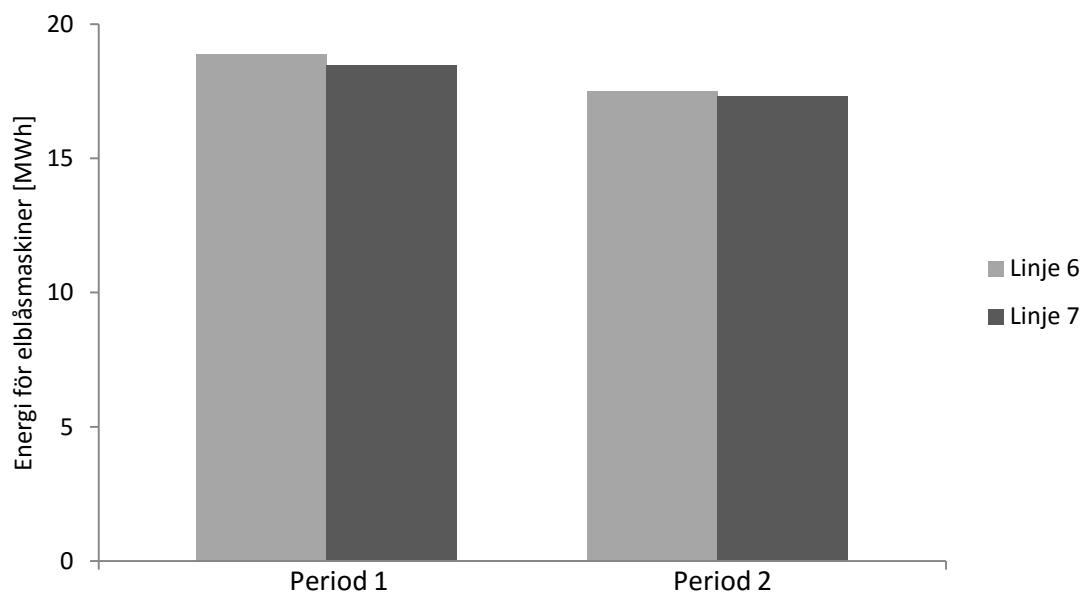
Figur 25. Syrehalter i linje 6 och linje 7 mellan klockan 12:00 till 21:00 under perioden 23/11-26/11 (mån-tor) när luftflödet var reglerbart. Syrehalten är redovisad i medelvärde per 30 min. Den röda linjen symboliserar syrebörvärdet (2,0 mg/l).

Under period 1 behövdes 372 Nm³ luft i linje 7 för att omvandla 1 kg ammoniumkväve och i linje 6 behövdes 378 Nm³ luft (Figur 26). Under period 2 behövdes 469 Nm³ luft i linje 7 och 481 Nm³ luft i linje 6 för att omvandla 1 kg ammoniumkväve. Det innebär att linje 7 behövde 1,7 % (standardavvikelse 0,5 %) mindre luftmängd per kilo omvandlad ammoniumkväve under period 1 och 2,5 % (standardavvikelse 1,0 %) mindre luftmängd under period 2 i jämförelse med linje 6 under respektive period.



Figur 26. Mängd luft per kilo omvandlat ammoniumkväve i linje 6 och 7 under perioden 1 och 2 med Alphameterreglering i linje 7 under period 1 (20/11-26/11) och ordinarie reglering under period 2 (30/11-6/12), redovisat i medelvärde för respektive period.

Energi för elmotorernas luftproduktion var för linje 6 med ordinarie reglering 18,9 MWh och för linje 7 med Alphameterreglering, 18,5 MWh under period 1 (Figur 27). Under period 2 med ordinarie reglering i både linje 6 och 7 var energiförbrukning 17,5 MWh i linje 6 och 17,3 MWh i linje 7. Under period 1 användes 2,2 % (standardavvikelse 0,8 %) mindre energi i linje 7 med Alphameter reglering än i linje 6 med ordinarie reglering och under period 2 med ordinarie reglering i båda linjerna användes 1,2 % (standardavvikelse 1,2 %) mindre energi i linje 7 än i linje 6. Det innebär att linje 7 under period 1 med Alphameter reglering och period 2 med ordinarie reglering använde 417 kWh respektive 206 kWh mindre än linje 6 under respektive period.



Figur 27. Mängd energi (MWh) som krävs av de eldrivna blåsmaskinerna under period 1 och 2 för linje 6 och linje 7 med Alphameterreglering under period 1 och ordinarie reglering under period 2. Värdena är medelvärden för hela perioden.

5. Diskussion

5.1 Processövervakning

Alphametern ger kontinuerligt data om aktivslamprocessen och ger en ökad förståelse för hur processen fungerar i realtid. Alphametern kan dock inte ge en tidigare signal vid en eventuell störning av processen. Det finns därmed ingen möjlighet att brädda avloppsvattnet som stör processen innan det når luftningsbassängerna eller möjligheten att tidigare sätta in driftåtgärder för att undvika en eventuell negativ påverkan på kvävereningen. Vid ett inkommande toxiskt material som slår ut en del av mikroorganismerna kommer luftflödet att minska eftersom det totala upptaget av syre hos mikroorganismerna blir mindre och därmed krävs ett lägre luftflöde för att klara att upprätthålla syrebörvärdet. Genom att luftflödet är lägre än normalt under en specifik period kan detta ge en signal om en störning i processen. Detta förutsätter normal belastning in till verket eftersom en lägre belastning också ger ett lägre luftflöde.

Då luftflödet minskar kommer också belastningen av ammoniumkväve att öka i de senare delarna av bassängen eftersom belastningen förskjuts på grund av att mindre ammonium omvandlas i de första zonerna och att mer ammonium därför når de sista zonerna. Det kommer att minska syrehalten i sista zonen (zon 6 som är oreglerad) då en större del av syret används för att oxidera ammoniumkvävet än tidigare, vilket också kan vara en signal på en störning. Syrehalten i zon 2 kommer fortfarande att variera kring syrebörvärdet eftersom regleringen justerar luftflödet efter att uppnå syrebörvärdet i den zonen.

Alphametern kan under en störning och därmed eventuell minskad biologisk aktivitet i luftningsbassängen ge ytterligare information om processen. OUR-värdet i zon 2 (huv 1) kommer troligtvis att minska då den biologiska aktiviteten avtar och därmed syreupptagningshastigheten hos mikroorganismerna. I zon 6 (huv 2) kommer OUR-värdet troligtvis att öka eftersom en större del av ammoniumkvävet når zonen då belastningen sprids ut mer över hela bassängen och därmed kommer en större del av syret omsättas av de ammoniumoxiderande bakterierna. OTE och SOTE kommer att öka i alla zoner då ett lägre luftflöde ger en längre stigtid för luftbubblorna och därmed en ökad kontakttid med vattnet (Figur 18).

OTR kommer inte ge någon extra information eftersom OTR beror av luftflödet vilket automatisk kommer minska vid en störning och därmed minskar också OTR. AlfaF kommer inte heller ge någon extra information eftersom det är kvoten mellan SOTE i processvattnet (beror av OTE) och beräknat SOTE enligt Appendix F.

Processparametrarna som ges av Alphametern har en viss osäkerhet då Alphametern inte är konstruerad för att installeras i en luftningsbassäng där zonvis reglering inte är möjlig. Det är dock inte de absoluta värdena som är viktigast ur en varningssynpunkt utan möjligheten till att kunna få kunskap om försämring av aktivslamprocessen.

Eftersom Alphameteren sitter i luftningsbassängen är det inte möjligt att fullständigt undvika skada på aktivslamprocessen vid ett industriutsläpp, vilket är en nackdel. På Landskrona reningsverk har de byggt en egen toxicitetsmätare vilken placeras nära inloppet och därmed före luftningsbassängerna. Det skapar möjligheten att brädda avloppsvattnet innan det når luftningsbassängerna och därmed fullständigt undvika att det toxiska ämnet når luftningsbassängerna vilket är en stor fördel i jämförelse med Alphameteren (Hagman, et al., 2013). Det rekommenderas att en sådan mätare byggs och installeras på Himmerfjärdsverket för att på bästa sätt kunna undvika skada på aktivslamprocessen.

Under projektets gång fanns flera tillfällen då industrier i upptagningsområdet meddelade utsläpp av ämnen som kan påverka kväveprocessen. Inga förändringar kunde dock ses på processparametrarna vid perioden för utsläppen. Utsläppen gav inte heller några bestående försämringar av kväveprocessen vilket stämmer överens med de oförändrade värdena. Eftersom mängden inkommande vatten var stor och att uppsamling av vattnet skedde innan vattnet pumpas upp till verkets första reningssteg skedde troligtvis en stor utblandning av eventuellt toxiskt ämne. Det innebär att koncentrationen av ämnet blir lågt när avloppsvattnet når luftningsbassängen, vilket kan minska risken för en eventuell försämring av kväveprocessen.

För att Alphameteren ska kunna beräkna processparametrar behöver den information om bland annat luftflödet till zonen där huvarna sitter placerade. Eftersom det endast fanns en luftflödesmätare för totalflödet till linjen användes det värde som insignal till enheten. Det innebär att Alphameteren reglerade utifrån att det var samma luftflöde över hela bassängen och det skulle ge cirka 17 % av totala luftflödet till varje zon (1-6). Det fanns tyvärr inga luftflödesmätare till varje zon men med informationen om antalet membran i varje zon samt totala antalet membran och antagandet att luftflödet över alla membran var lika kan en procentuell fördelning av luftflödet beräknas (Tabell 6). Det skulle innebära att 22 % av luftflödet borde gå till zon 2 eftersom antalet membran i zon 2 motsvarar 22 % av det totala antalet membran i hela linjen. Om antagandet stämmer innebär det att Alphameteren baserar sina beräkningar på ett cirka 5 % lägre luftflöde än det troligtvis korrekta värdet. För att undersöka hur processparametrarna påverkades av detta justerades det totala luftflödet och inställningarna för att representera zon 2 (Tabell 7), vilket troligtvis gav ett mer korrekt värde på luftflödet till zon 2.

Resultat av att ändra luftflödet och inställningarna för att representera zon 2 gav ingen markant förändring på OTE, SOTE och AlfaF i jämförelse med tidigare inställning för hela bassängen (Tabell 5). OUR ökade dock med cirka 10 mg/l/h vid inställningarna för zon 2 vilket borde vara mer korrekt eftersom luftflödet egentligen var högre än vad som angavs till Alphameteren. Det bygger på att antagandet med samma flöde över alla membran var korrekt. OTR minskade på grund av att beräkningen visar på den syremängd som löser sig i vattnet till zon 2 och inte till hela bassängen, vilket är lägre. Genom att välja platsspecifika inställningar efter zon 2 kan en bättre uppskattning av processparametern OUR erhållas. Det innebär också generellt att för andra zoner

kommer flödet per membran bli mer korrekt och därmed också AlfaF vilket baseras på SOTE vid ett visst luftflöde per membran (Appendix C).

Den generella inställningen som representerar hela bassängen ger att OTE, SOTE, AlfaF och OTR från huv 2 (zon 6) inte stämmer eftersom beräkningarna bland annat baseras på ett högre luftflöde än det verkliga. Syrehalten var också mycket hög (6-9 mg/l) vilket innebär att Alphameteren beräknar processparametrar utifrån den informationen, vilket ger orimligt höga värden på processparametrarna. Därför har de värdena inte presenterats i rapporten. Problemet finns inte om zonvis reglering av luftflödet är möjligt. OUR-värdet från huv 2 (zon 6) är dock korrekt och kan användas för att upptäcka störningar i processen.

En fördel med Alphameteren är att den visar SOTE över en längre tidsperiod och när SOTE sjunker kan det vara en signal på att membran behöver rengöras eller bytas ut. Tidigare studier av Gori et al. (2014) och Schuchardt et al. (2007) har visat att off-gas analysutrustningen kan minska behovet av regelbundna kontroller på membranen genom analys av SOTE, vilket innebär att onödiga ingrepp kan undvikas och därmed ett avbrott i reningsprocessen.

5.2 Reglering

Vid en hög belastning beräknar Alphameteren ett högre önskat luftflöde än vad systemet kunde producera, vilket skedde under cirka halva dygnet. Det innebär att ingen fullständig bedömning av Alphameterens eventuella förbättringsmöjligheter med avseende på energieffektivisering kunde göras. Detta beror på att elmotorerna justeras efter trycket i kollektorn och den klarar ett maximalt tryck på 59 kPa. Vid ett tryck på 59 kPa i kollektorn kunde inte elblåsmaskinerna öka luftproduktionen eftersom maximalt lufttryck är uppnått. Det gör i sin tur att Alphameterregleringen var begränsad under tiden som belastningen in till verket var hög. Eftersom utvärderingen också endast varade under en vecka går det inte att dra några slutsatser för hur Alphameteren skulle prestera under en längre period, till exempel ett år.

Linje 7 med reglering av Alphameteren under period 1 använde 6 Nm³ luft per kilo omvandlad ammoniumkväve mindre än linje 6 under samma period. Under period 2 använde linje 7 med ordinarie reglering 12 Nm³ luft per kilo omvandlad ammoniumkväve mindre än linje 6. Skillnaderna under de båda perioderna visar på att linje 7 har en bättre reningseffekt än linje 6 oavsett om Alphameteren eller den ordinarie regleringen är aktiv. Resultatet visar också att den skillnaden som fanns mellan linje 6 och 7 under period 1 inte beror på Alphameteren eftersom skillnaden mellan linje 6 och 7 finns kvar även under ordinarie reglering. Skillnaden mellan linjerna beror troligtvis av skillnader i luftningskapacitet genom att membranen var i olika skick och därmed kan mindre luftbubblor skapas i linje 7. De mindre luftbubblorna ökar kontaktarean mellan syre och vatten samt ökar kontakttiden då en långsammare stigning sker. Det kan också vara så att igensättningen av membranen innebär att det krävs ett ökat lufttryck över membranen, vilket ökar luftflödet hos linjen med sämre membran. Ytterligare anledning

till skillnaden mellan linjerna kan bero på skillnad hos syregivarna. Om syregivaren i en linje visar ett lägre värde än det korrekta skulle det också innebära ett högre luftflöde än nödvändigt vilket skulle påverka jämförelsen.

Eftersom period 1 och 2 skiljer sig med avseende på inflöden och belastning kan resultaten från linje 7 under de olika perioderna inte användas, då förutsättningarna var olika. Men eftersom skillnaden med avseende på luft per kilo omvandlad ammoniumkväve mellan linjerna kvarstår även under period 2 finns inget som tyder på att Alphametern skulle kunna reglera processen på ett mer energieffektivt sätt. Skillnaden i energianvändningen mellan de olika linjerna under de olika perioderna var större under period 1 med Alphameterreglering. Det beror troligtvis på att mängden inkommande ammoniumkväve var lägre under period 2 (Tabell 12) och därmed klarar linje 6 att syresätta vattnet nästan lika bra som linje 7 eftersom membranen inte var maximalt belastade. Det fanns också en fördel för den ordinarie regleringen med avseende på mindre avvikelse från syrebörvärdet under period 1 (Figur 25). Avvikelsen från syrebörvärdet med Alphameterreglering beror mycket på vilka styreinställningar som används i Alphametern och därmed kan avvikelsen från syrebörvärdet förändras. Alphametern skulle kunna användas för att analysera processen men behövs inte för att reglera luftflödet eftersom i Syvabs fall är den nuvarande regleringen lika bra eller bättre än Alphametern.

Med dagens utformning av luftningsbassängerna har Alphametern svårt att bidra till förbättrad syrerreglering eftersom det bara fanns en luftventil in till hela bassängen. Alphametern är egentligen designad för att kunna reglera varje zon separat och i detta fall blir hela luftningsbassängen en enda zon, vilket försvårar regleringen. För en komplett utvärdering av Alphameterns förbättringsmöjligheter behöver den installeras i linje 3 som har zonvis reglering av luftflödet.

Vid test att reglera luftflödet med inställningar för zon 2 gavs en syrehalt i zon 2 som konstant var 0,3-0,4 mg/l under syrebörvärdet, variationerna på syrehalten var dock små. Det är därmed inte möjligt att använda inställningar för zon 2 för att reglera luftflödet för hela bassängen. Det krävs en zonvis reglering av luftflödet för att kunna använda inställningar som gäller per zon.

Den största skillnaden mellan reglering med Alphameter jämfört med ordinarie reglering är att Alphametern beräknar mängden luft som behöver tillsättas för att göra en specifik ökning av syrehalten. Från tidigare studier av Trillo et. al (2004) på Erlangen avloppsreningsverk visades att Alphametern kan minska avvikelsen mellan syrehalten och syrebörvärdet till 0,2 mg/l (kapitel 2.6.1). På Syvab fanns redan en god reglering som klarar av att hålla syrevärdet (avvikelse 0,18 mg/l) nära syrebörvärdet utan stora oscillationer och därmed skedde ingen förbättring (Figur 25). Eftersom regleringen endast sker under cirka halva dygnet när luftflödet inte är maximalt finns mindre möjlighet till att förbättra regleringen, vilket givetvis har en betydelse. Det är möjligt att Alphametern kan uppnå bättre reglering av syrehalten i bassängen vid en annan reglerinställning samt vid möjlighet till zonvis reglering. På Erlangens reningsverk

uppvisades också minskade luftflöden med 15-25 % genom implementering av Alphameter. Skillnaden mellan detta försök och Erlangen var att på Himmerfjärdsverket fanns ingen möjlighet att reglera luftflödet zonvis och på det sättet skapa en energieffektiv syrehaltsprofil, vilket gjordes på Erlangen med hjälp av värdena på OUR från Alphameter. Den största energieffektiviseringen på Erlangen skedde vid ändrade syrebörvärden i de olika zonerna i bassängen för att på så sätt jämna ut den biologiska belastningen över hela bassängen (Kapitel 2.6.1). Alphameter kan vara ett bra verktyg för att ta fram en energieffektiv syrehaltsprofil. En syreprofil kan skapas även utan Alphameter genom tester av olika syreprofiler vilket bland annat har undersökts av Andersson (2012) och Wiig (2012).

Vid hastiga förändringar av förutsättningarna för att tillsätta syre till vattnet kan Alphameter ändra luftbörvärdet för att inte syrehalten ska bli högre eller lägre än syrebörvärdet. Problemet var att Alphameter ger ett nytt börvärde var 10:e min och därmed justerades inte luftflödet under de eventuellt korta perioderna när förutsättningarna för att tillsätta syre snabbt förändras. Belastningen in till verket har få tidpunkter när stora variationer uppkommer under kort tid och därmed fanns det få tillfällen där Alphameter kan vara till nytta i jämförelse med ordinarie reglering även om intervalltiden för nytt börvärde skulle vara kortare.

Det fanns ingen möjlighet att använda ammoniumåterkopplingen i linje 3 på grund av att den var avstängd under stora delar av projektet. Därför kunde ingen jämförelse göras mellan Alphameter och ammoniumåterkoppling. Ett tidigare examensarbete på Himmerfjärdsverket av Andersson (2012) visade att det krävdes 351 Nm^3 luft per kilo omvandlad ammoniumkväve, vilket är 21 Nm^3 luft per kilo omvandlad ammoniumkväve mindre än under period 1 i linje 7 med Alphameterreglering. Börvärdet för ammoniumåterkopplingen var $1,5 \text{ mg NH}_4\text{-N/l}$ och för Alphameter ett syrebörvärde på $2,0 \text{ mg/l}$, vilket gav cirka $0,5\text{-}1,0 \text{ mg NH}_4\text{-N/l}$ ut från zon 6 (Figur 19). Mängden inkommande ammoniumkväve var också högre under perioden med Alphameterreglering än under perioden med ammoniumåterkoppling. Detta innebär att det inte går att dra några slutsatser om hur Alphameter presterar relativt ammoniumåterkoppling eftersom förutsättningarna var olika. För att dra några klara slutsatser bör Alphameter och ammoniumåterkopplingen jämföras under samma period och under samma förutsättningar. Dock visar tidigare studier av Åmand (2015) att ammoniumåterkoppling är mer energieffektivt än reglering med konstanta syrehalter. Eftersom ingen markant skillnad i energiåtgång kunde påvisas under utvärderingsperioden mellan Alphameterreglering och ordinarie reglering borde därmed också ammoniumåterkoppling vara mer energieffektivt än Alphameterreglering.

Vid ett flertal tillfällen under projektets gång har det uppstått kraftiga oscillationer hos luftbörvärdet hos Alphameter. Det är oklart varför dessa oscillationer har uppkommit men det innebär en onödig påverkan på processen och speciellt på luftventilen som snabbt måste justera luftflödet till luftningsbassängen. En hypotes är att det kommer in atmosfärluft från utsidan av huven eftersom vattenytan är turbulent och huven rör sig

en aning upp och ned. Det innebär att off-gas analysen blir felaktig då analysen sker även på inkommande atmosfärsluft.

5.3 Installation av Alphametern

När utrustningen levererades ett flertal veckor senare än avtalat fanns inte den kommunikationsport (Profibus) som behövdes för installation på Himmerfjärdsverket. Utrustningen levererades även utan luftslang vilket inte framgick vid beställningen. Ingen information fanns i manualen om vilken typ av luftslang eller vilken dimension som skulle användas. Luftslang fick inköpas separat tillsammans med frostskydd för luftslangarna. Det fanns också oklarheter angående vem som skulle utföra installationen. Allt detta tillsammans gjorde att det tog längre tid än planerat innan Alphametern var installerad. Det resulterade i en kortare undersökningsperiod än planerat eftersom projektet var tidsbegränsat. Det är fördelaktigt om personal från Invent eller återförsäljare i Sverige kommer till verket och både installerar utrustningen samt går igenom hur Alphametern fungerar och hur inställningar kan göras.

Eftersom installationsanvisningarna var mycket bristfälliga monterades stagen som håller huven på plats enligt vad som tycktes vara logiskt. Det visade sig senare att stagen ska snurras 180 grader för att böjen närmast huven ska peka ned emot huven och inte vara parallell med huven (Figur 13). Felet justerades inte under projektets gång eftersom det inte hade avgörande betydelse för funktionen.

Under projektets gång har det funnits stora problem med reglerinställningar då de inställningar som har valts har automatiskt återställts till ursprungsvärden. Det skedde vid ett flertal tillfällen och problemet löstes inte under projektets gång utan en speciallösning gjorde så att olika inställningar kunde utvärderas.

Efter att installationen av utrustningen är klar behöver inställningarna för regleringen göras. I detta läge skulle det också behövas en grundlig förklaring på hur de olika kontrollparametrarna fungerar och vad som sker vid ändring av respektive kontrollparameter. Det vore fördelaktigt om det fanns förklarat i manualen. För projektet fick tester göras för att se vad som sker vid ändring av olika parametrar.

Eftersom Alphametern består av ett kontrollskåp och två huvar med tillhörande luftslang finns problemet med fysisk skada på utrustningen. Problem kan uppstå med luftslangarna som kan gå sönder. Det finns också risk för igensättning i luftslangen vid minusgrader. Det beror på att kondensvatten kan fastna på insidan av slangen och sedan frysa till is och därmed sätta stopp i slangen. Vid höga luftflöden rör sig huven på vattenytan och vid långvarigt slitage kan fästena gå sönder. Eftersom det kan uppstå skum i luftningsbassängen skulle det kunna orsaka stopp i slangen vid off-gas analys. Det finns ett flertal scenarion där utrustningen skulle kunna sluta fungera och då behövs ett skyddsnät som automatiskt övergår till den tidigare regleringen. Ett sådant skyddsnät kommer se olika ut från verk till verk och kan vara problematiskt att programmera. Det bör också tilläggas att eftersom vattnet var turbulent vid huv 1, zon 2, fanns risk för att

luft trängde in utifrån. Det rekommenderas att installera huven i en lugnare zon eller på annat sätt minska turbulensen.

5.4 Förbättringsmöjligheter för utvärderingen

Eftersom leveransen och installationen av Alphamatern skedde senare än planerat gavs mindre tid till att optimera regleringen och undersöka styrinställningarnas påverkan på luftflödesregleringen. Det innebär att eventuellt skulle en bättre reglering kunna uppnås vid ytterligare optimering av Alphamatern. Den viktigaste faktorn för att Alphamatern ska kunna bidra till en förbättrad reglering är möjligheten till att mäta och reglera luftflödet zonvis. Eftersom den möjligheten inte fanns i linje 7 är utvärderingen inte fullständig med avseende på Alphamaterns eventuella förbättringsmöjligheter. Fördelaktigt hade varit att installera Alphamatern i linje 3 där zonvis reglering av luftflödet är möjligt.

Valet av referenslinje för den ordinarieregleringen baserades på att linjen skulle vara i samma block för att få returslam från samma slamficka. Dock framkom i efterhand att membranen i linje 6 var cirka 3 år äldre än i linje 7, vilket inte var fördelaktigt ur en jämförelsesynpunkt. Mer fördelaktigt hade varit att välja linje 5 som har membran av samma ålder (Tabell 4). Det skulle troligtvis innebära att de båda linjerna hade presterat lika under utvärderingsperioden, det skulle dock inte innebära någon annan slutsats för Alphamaterns förbättringsmöjligheter.

En förstudie borde utförts där det undersökts hur olika linjer skiljer sig åt med avseende på belastning och reningseffektivitet för att hitta två linjer inom samma block som har samma förutsättningar. Det är också viktigt att syrehalten inte oscillerar och verkligen visar det korrekta värdet eftersom Alphamatern reglerar utifrån syrehalten. Därför borde de berörda syregivarna ha kontrollerats och bytts ut inför projektet för att säkerställa att mätningen var korrekt och förutsättningarna lika för de båda linjerna. Det finns en så kallad skiljeförstärkare på varje linje mellan syregivaren och PLC:n som också borde kontrollerats för att se att den fungerar som den ska för att signalen från syregivaren ska bli korrekt.

5.5 Framtida studier

Eftersom det fanns problem vid ändring av reglerinställningarna bör vidare undersökningar göras för andra inställningar. För att undersöka om regleringen av processen kan bli snabbare kan GAS-parametern minskas för att få en snabbare reglering. Det är inte säkert att detta ger en mer energieffektiv reglering dock en snabbare reglering. Genom att koppla bort huv 2 via kontrollpanelen på Alphamatern kan GAS-parametern minskas till 5 min och analysiden (4 min) skulle därmed fortfarande vara tillräckligt lång för att få ett korrekt värde. Det skulle innebära att ett nytt luftbörvärde skickas till luftflödesregulatorn var 5:e minut. De övriga inställningsparametrarna (DO_{diff} , NSS) kan minskas för att undersöka om en snabbare och bättre reglering kan uppnås. DO_{diff} är den parameter som har den största påverkan

på regleringen och bör därmed ha störst fokus vid en eventuell trimning. NSS bör väljas till en tid som är lika med eller kortare än tiden mellan off-gas analyserna. Det innebär för en tid på 5 min på GAS-parametern och endast en kontrollerande huv kan i teorin NSS väljas till 1 min eftersom det är den tiden som gasanalysen inte sker och antagandet om "steady state" inte gäller. Under den tiden sker kalibreringen av koldioxid och syre mot atmosfärsluften.

Ytterligare framtida utvärderingsmöjligheter kan vara att använda ammoniumgivaren i linje 7 som utvärderingsparameter och därmed kan syrebörvärden för Alphametern justeras för att uppnå en viss medelhalt av ammonium per dygn i zon 6. Eftersom de platsspecifika inställningarna för zon 2 inte gav den regleringen som önskades kan det också undersökas vad som sker om platsspecifika inställningar matas in för att reglera halva bassängen.

Utvärdering av signalen från syregivaren är intressant att undersöka ytterligare. Under projektet användes ett medelvärde av syregivarens mätningar som insignal till Alphametern. Varje minut gavs ett nytt syrevärde från zon 2 till NXW och ett medelvärde av 2 min skickades till Alphametern. För att undersöka om Alphametern skulle ge ett bättre resultat kan ett annat medelvärde eller det specifika värdet (ett nytt värde varje sekund) skickas till Alphametern.

Alphamaterns möjlighet till förbättrad reglering är störst på en linje där det finns möjlighet att reglera luftflödet zonvis. Genom att installera två huvar i en varsin kontrollerbar zon finns möjligheten att få en bättre reglering. I studien användes en huv för att reglera luftflödet till hela bassängen. Det hade varit fördelaktigt att installera Alphametern i linje 3 där zonvis reglering är möjlig med luftflödesmätare och syregivare i respektive zon. För att också nå Alphamaterns fulla potential uppmanar Invent att Alphametern direkt ska kunna reglera luftflödesproduktionen hos blåsmaskinen och inte ventilen. Detta var tyvärr inte möjligt på Himmerfjärdsverket.

5.6 Felkällor

Eftersom det inte fanns tillgång till någon temperatur i luftningsbassängen valdes att använda temperaturen från utgående vatten. Temperaturmätningen från ingående vatten i tunneln visar 1-2 ° C lägre temperatur än utgående vatten vilket kan ha påverkat resultatet.

För att Alphametern ska kunna ge den optimala regleringen av luftflödet krävs att syregivarna visar på ett korrekt värde. Eftersom syregivarna oftast sitter nära vattenytan är det inte säkert att den syrehalten är representativ för hela zonen eller bassängen. Detta kan leda till att det sker en överskattning av den genomsnittliga syrehalten i de luftade zonerna.

På grund av tidsbrist fanns inte möjlighet att utvärdera Alphametern under en längre period vilket minskar resultatens trovärdighet. Under ett år på reningsverket ser

belastningen och förutsättningarna olika ut och kan därmed gynna eller missgynna Alphameterreglering av luftflödet. Resultatet är därmed inte representativt för hela året.

För dygnsprovtagning innan och efter luftningsbassängerna finns risk för förhöjda halter av ammoniumkväve och TOC om inte hållarna rengörs efter anvisning. Vid analys på laboratorium finns risk för felaktigt utförande vid analys.

Betafaktorn baseras på halten av total löst substans (eng. Total Dissolved Substance (TDS)) i luftningsbassängen och inte SS-halten vilket uppgavs av installatören. Värdet under utvärderingen var 0,96 och skulle egentligen vara 0,98.

Eftersom dygnsprovtagarna för ammoniumkväve placerades vid utloppet för eftersedimenteringen kan inte resultatet visa på vad som skedde i luftningsbassängen utan ger en bild av nitrifikationen från starten på luftningsbassängen till slutet på eftersedimenteringen. Nitrifikationen kan fortgå även efter luftningsbassängerna när vattnet passerar mellan- och eftersedimentering. Dygnsprovtagarna kunde inte placeras tidigare i reningssteget på grund av att vattnet var för smutsigt och därmed skulle det uppstå kontinuerliga stopp i provtagaren. Eftersom dygnsprovtagarna inte var flödesproportionella utan tidsinställda finns en viss osäkerhet hos analysen. Det skedde endast analys av halten ammoniumkväve i utgående vatten och därmed är det svårt att säga om nitrifikationen var fullständig eller om en andel av inkommande kvävet endast omvandlades till nitrit.

Den 24/11/2015 gjordes ingen analys av inkommande ammoniumhalt och den 26/11/2015 analyserades inga prover på grund av sjukdomsfrånvaro i laboratorium. Medelvärde skapades utifrån de övriga värdena från proverna på vardagarna under period 1.

6. Slutsatser

- Alphameteren kunde inte påvisa en mer energieffektiv reglering av luftflödet i jämförelse med ordinarie reglering givet de reglerinställningar som användes under utvärderingsperioden. Eftersom utvärderingsperioden endast varade under en vecka går det inte dra några slutsatser för hur Alphameteren skulle prestera under en längre period i jämförelse med den ordinarie regleringen. För en fullständig utvärdering av Alphameteren behöver den installeras i en linje med zonvis reglering av luftflödet.
- Alphameteren kan inte ge en tidigare signal vid en eventuell störning av kväveprocessen. Den kan dock ge ytterligare information om processen vid en eventuell störning. Det finns därmed ingen möjlighet att tidigare sätta in driftåtgärder eller att brädda avloppsvattnet innan luftningsbassängen för att undvika att toxiskt inkommande material når aktivslamprocessen.

En fördel med Alphameteren är att den kan användas för att få en bättre bild av processen i olika zoner i luftningsbassängen och därmed kan den mest energieffektiva inställningen för syrebörvärden i olika zoner hittas. Det kan därmed skapas en jämnare biologisk belastning (OUR) över hela bassängen och troligtvis minska det totala luftflödet med bibehållen reningsgrad. Det förutsätter att zonvis reglering av luftflödet är möjlig samt att huvarna flyttas mellan olika zoner. Ytterligare fördel med Alphameteren är att den ger information om membranens kvalité, vilket kan underlätta underhållet av membranen och därmed kan onödiga avbrott i luftningssteget undvikas.

- Nackdelarna med Alphameteren är större risk för driftproblem då styrsåpet är placerat utomhus och kan därmed utsättas för yttre påverkan. Om Alphameteren används för att reglera luftflödet behövs någon form av säkerhetssystem som automatisk byter till den ordinarie regleringen vid eventuella problem, för att undvika att luftflödet avstannar.

Referenser

American Society of Civil Engineers (ASCE), 1996. *Standard Guidelines for In-Process Oxygen Transfer Testing*, New York: American Society of Civil Engineers (ASCE).

Andersson, S., 2012. *Ammoniumåterkoppling på Himmerfjärdsverket – utvärdering genom försök och simuleringar*, Uppsala: Examensarbete i Miljö- och vattenteknik, Uppsala Universitet.

Carlsson, B., 2012. *An Introduction to modelling bioreactors [Kursmaterial kommunal och industriell avloppsvattenrening]*. 19:e mars 2012 red. Uppsala: Division of System and Control, Department of Information Technology .

Carlsson, B. & Hallin, S., 2010. *Tillämpad reglerteknik och mikrobiologi i kommunala reningsverk*. Stockholm: Svenskt Vatten AB.

Gori, R., Balducci, A., Caretti, C. & Lubello, C., 2014. Monitoring the oxygen transfer efficiency of full-scale aeration systems: investigation method and experimental results. *Water Science & Technology*, juli, 70(1), pp. 8-14.

Hagman, M., Jeppson, A. & Gustafson, P., 2013. *Varningssystem för toxiska ämnen – erfarenheter av drift i fullskala på avloppsreningsverk*, Helsingborg: Nordvästra Skånes Vatten och Avlopp.

Invent Aeration Services S.r.l., 2010. *Invent*.

Tillgänglig via: <http://www.invent-uv.de/alphameter-2/>
[Använd 31 augusti 2015].

Invent Aeration Services, SRL , 2013. *Alphameter Installation, Operation and Maintenance Manual*, Monza, Italien: Invent.

Jenkins, T. E., 2014. *Aeration Control System Design: A practical Guide to Energy and Process Optimization*. 1:a red. Somerset, USA: John Wiley & Sons Inc..

Lindberg, C.-F., 1997. *Control and estimation strategies applied to the activated sludge*, Uppsala Universitet: Doktorsavhandling.

Martins, A. M., Pagilla, K., Heijnen, J. J. & van Lossdrecht, M. C., 2004. Filamentous bulking sludge-a critical review. *Water Research*, februari, 38(4), pp. 793-817.

Schuchardt, A. o.a., 2007. Evaluation of oxygen transfer efficiency under process conditions using the dynamic off-gas method. *Environmental Technology*, juni, 25(5), pp. 479-489.

Stark Fujii, K., 2015. *Processingenjör Syvab* [Personligt meddelande] (22 september 2015).

Svenskt Vatten AB, 2013. *Avloppsteknik 2 - Reningsprocessen*. Stockholm: Svenskt Vatten AB.

Syvab, 2014a. *Energi och materialflöde*.

Tillgänglig via: <http://www.syvab.se/himmerfjardsverket/energi-och-materialflode>
[Använd 2 september 2015].

Syvab, 2014b. *Anläggningsdata*.

Tillgänglig via: <http://www.syvab.se/himmerfjardsverket/anlaggningsdata>

[Använd 10 september 2015].

Syvab, 2014c. *Miljörapport 2014*, Gröninge: Syvab Himmerfjärdsverket.

Syvab, 2015a. *Vattnets väg genom verket*.

Tillgänglig via: <http://www.syvab.se/himmerfjardsverket/vattnets-vag>

[Använd 31 augusti 2015].

Syvab, 2015b. *Årsredovisning 2014*, Grödinge: Syvab AB.

Tchobanoglous, G., Burton, F. L. & Stenstel, H. D., 2003. *Wastewater engineering-Treatment and reuse*. 4:a red. New York: Mcgraw-Hill.

Trillo, I. o.a., 2002. *Implementation of Feedforward Control Using On-Line Offgas Analysis: The Grafton WWTP Experience*, Sant Cugat del Valles, Spain: Advanced Aeration Control LLC.

Trillo, I. o.a., 2004. Implementation of Feedforward Aeration control using on-line analysis: The Grafton WWTP Experience. *Proceedings of the water environment federation*, Volym 7, pp. 27-45.

Trillo, I. & Smith, M., 2014. *Process and aeration optimisation using online offgas analysis*, Barcelona och Australien: ATC och Invent pacific.

U.S. Environmental Protection Agency, 1989. *Design manual, Fine Pore Aeration systems*, u.o.: EPA.

Wiig, L., 2012. *Utvärdering av reglerstrategier i luftningssteget på Himmerfjärdsverket*, Stockholm: Examensarbete i Kemiteknik, KTH.

Åfeldt, E., 2011. *Utvärdering och förbättring av syrereglering vid Himmerfjärdsverket*, Stockholm: Examensarbete Industriell ekologi, KTH.

Åmand, L., 2015. *Implementering och utvärdering av ammoniumåterkoppling i fullskala*, Stockholm: IVL Svenska Miljöinstitutet.

Åmand, L. & Carlsson, B., 2012. Optimal aeration control in a nitrifying activated sludge process. *Water Research*, 28 januari, pp. 2101-2110.

Åmand, L., Olsson, G. & Carlsson, B., 2013. Aeration control - a review. *Water Science & Technology*, Volym 67, pp. 2374-2398.

Appendix A

Konstanter som används för beräkningar i Alphameteren och de utdata som ges.

Physical Constants			
Description	Symbol	Units of Measure	Default Value
Density of air at normalized conditions	ρ_{da_N}	kg/m ³	1.293
Temperature correction factor for OTE	θ	none	1.024
Ratio of DO saturation in process water to saturation in clean water	β	none	0.98
Molecular weight of dry air	mw_{dry_air}	g/mol	28.96
Molecular weight of water	mw_{H_2O}	g/mol	18.016
Molecular weight of Oxygen	mw_{O_2}	g/mol	32.00
Molecular weight of Carbon dioxide	mw_{CO_2}	g/mol	44.01
Molecular weight of Nitrogen	mw_{N_2}	g/mol	28.00
Molecular weight of Argon	mw_A	g/mol	39.94
Percent volume of Nitrogen, dry air	%vN _{2da}	%	78.08%
Percent volume of Oxygen, dry air	%vO _{2da}	%	20.94%
Percent volume of Argon, dry air	%vA _{da}	%	0.94%
Percent volume of carbon dioxide, dry air	%vCO _{2da}	%	0.04%
Molecular weight of inert gases (nitrogen and argon) in dry air	mw_{inerts_da}	g/mol	28.14
Saturation concentration of O ₂ in clean water at 1 atmosphere, and 20°C	C _{S20}	mg/l	9.09

Key Calculation Results For Transmitter			
Description	Symbol	Units of Measure	Comment
Air flow rate per diffuser	Q_{Diff}	Nm ³ /h/diffuser	
Oxygen transfer efficiency at field conditions	OTE _f	%	
Actual oxygen transfer rate at field conditions	AOTR _f	kg/h	For the control zone or tank corresponding to the diffuser quantity identified above
Standard oxygen transfer efficiency in clean water at the actual air flow per diffuser	SOTE	%	OTE corrected to 0 mg/l DO, 20°C, 1 atmosphere and clean water
Standard oxygen transfer efficiency in <u>process</u> water	SOTE _{pw}	%	OTE corrected to 0 mg/l DO, 20°C, 1 atmosphere and actual site process water
Combined alpha and fouling factor	αF	none	$\alpha = \frac{SOTE_{pw}}{SOTE}$
Oxygen uptake rate from the process requirement	OUR _{proc_req}	mg/l/h	Includes carbonaceous, nitrogenous, and endogenous

Appendix B

Tabell 14. Förhållanden under utvärderingsperiod 1 gällande luftflödet, slamåldern och vattennivå i kanalen in till respektive luftningsbassäng. Symbolen * betyder att resultatet baseras på ett flerdagarsprov över helgen (fre, lör och sön) och symbolen m innebär att data är ett medelvärde baserat på mån-ons. Alla värden representerar dygnsmedelvärden

Tidpunkt (Period 1)	Luftflöde [Nm ³ /h]		Slamålder [dagar]		Vattennivå kanal [mm]	
	L6	L7	L6	L7	L6	L7
20/11	5283	5219	16,1*	16,5*	340	343
21/11	5606	5456	15,7*	16,0*	328	328
22/11	5706	5541	14,9*	15,0*	318	316
23/11	5570	5448	20,0	19,5	304	301
24/11	5856	5673	19,5	19,1	305	302
25/11	5745	5611	20,1	19,7	324	324
26/11	5566	5516	19,9 ^m	19,4 ^m	313	311
Medelvärde	5620	5495	19,9	19,4	319	318

Tabell 15. Totaltvattenflöde och flöde till linje 6 och 7 under period 1 samt analysresultat för ammoniumkväve och TOC under samma period. Symbolen m innebär att värdet är ett medelvärde av de andra vardagarna (mån-tor) på grund av att inget värde analyseras den dagen. Symbolen * betyder att resultatet baseras på ett flerdagarsprov över helgen (fre, lör och sön). Alla värden representerar dygnsmedel

	Totalt inflöde [m ³ /d]	Del av totalflöde [%]	Flöde [m ³ /d]	NH4-N in [mg/l]	NH4-N ut [mg/l]	TOC in [mg/l]	TOC ut [mg/l]
Period 1 (L6)							
20/11-22/11	115133	0,1421	16357	23,80*	0,277*	44,9*	12,5*
23/11	100500	0,1447	14539	22,00	0,134	38,9	12,4
24/11	100300	0,1453	14569	23,67 ^m	0,182	47,6	12,4
25/11	108100	0,1455	15732	25,20	0,184	42,9	12,7
26/11	106000	0,1467	15546	23,67 ^m	0,167 ^m	43,1 ^m	12,5 ^m
Medelvärde	106007	0,1448	15353	23,67	0,189	43,5	12,5

	Totalt inflöde [m ³ /d]	Del av totalflöde [%]	Flöde [m ³ /d]	NH4-N in [mg/l]	NH4-N ut [mg/l]	TOC in [mg/l]	TOC ut [mg/l]
Period 1 (L7)							
20/11-22/11	115133	0,1425	16402	23,80*	0,309*	38,9*	13,3*
23/11	100500	0,1439	14458	22,00	0,114	47,6	13,8
24/11	100300	0,1434	14380	23,67 ^m	0,187	42,9	12,4
25/11	108100	0,1442	15591	25,20	0,205	43,1	13,5
26/11	106000	0,1468	15562	23,67 ^m	0,169 ^m	43,5 ^m	13,2 ^m
Medelvärde	106007	0,1441	15280	23,67	0,212	43,2	13,2

Tabell 16. Förhållanden under period 2 gällande luftflödet, slamåldern och vattennivå i kanalen in till respektive luftningsbassäng. Symbolen * betyder att resultatet baseras på ett flerdagarsprov över helgen (fre, lör och sön). Alla värden representerar dygnsmedelvärden

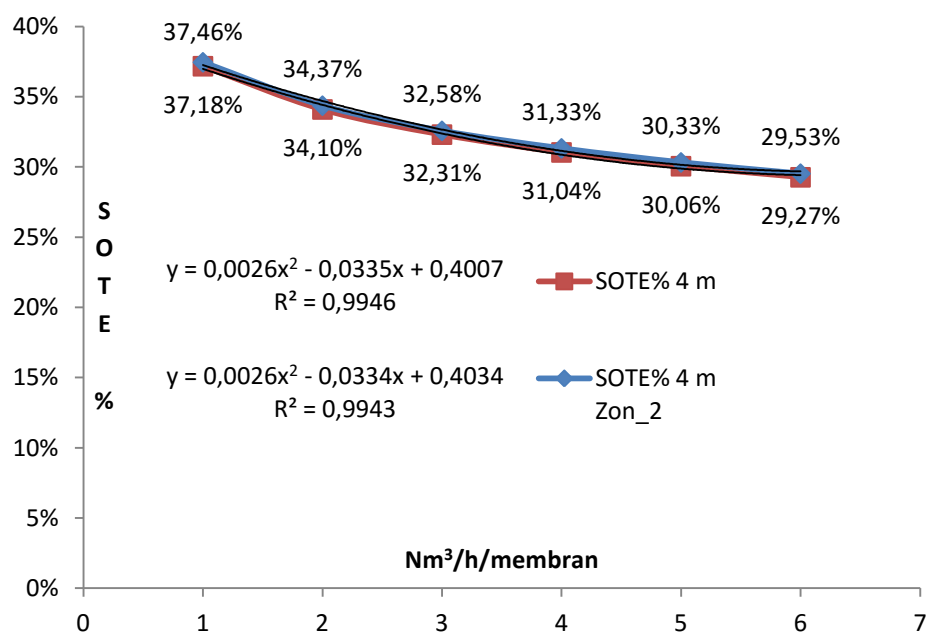
Tidpunkt (Period 2)	Luftflöde [Nm ³ /h]		Slamålder [dagar]		Vattennivå kanal [mm]	
	L6	L7	L6	L7	L6	L7
30/11	5223	5157	16,3	16,4	367	376
1/12	5448	5298	17,7	17,7	368	376
2/12	5152	5150	20,9	21,1	332	334
3/12	5524	5407	19,4	19,7	325	326
4/12	5132	5191	20,9*	21,1*	342	346
5/12	5107	5022	20,0*	20,2*	346	351
6/12	4879	4813	20,9 *	21,1*	335	339
Medelvärde	5235	5152	19,4	19,6	345	350

Tabell 17. Totaltvattenflöde och flöde till linje 6 och 7 under period 2 samt analysresultat för ammoniumkväve och TOC under samma period. Symbolen * betyder att resultatet baseras på ett flerdagarsprov över helgen (fre, lör och sön). Alla värden representerar dygnsmedelvärden

Period 2 (L6)	Totalt inflöde [m ³ /d]	Del av totalflöde [%]	Flöde [m ³ /d]	NH4-N in [mg/l]	NH4-N ut [mg/l]	TOC in [mg/l]	TOC ut [mg/l]
30/11	117500	0,1351	15874	14,0	0,106	39,5	13,6
1/12	125400	0,1353	16967	16,3	0,081	37,5	12,9
2/12	127100	0,1354	17209	17,5	0,093	40,8	12,7
3/12	121800	0,1355	16504	16,5	0,104	35,9	12,5
4/12-6/12	134100	0,1349	18090	14,6*	0,084*	30,2*	10,4*
Medelvärde	125180	0,1352	16929	15,8	0,094	43,5	12,4

Period 2 (L7)	Totalt inflöde [m ³ /d]	Del av totalflöde [%]	Flöde [m ³ /d]	NH4-N in [mg/l]	NH4-N ut [mg/l]	TOC in [mg/l]	TOC ut [mg/l]
30/11	117500	0,1354	15910	14,0	0,104	39,5	15,5
1/12	125400	0,1370	17180	16,3	0,064	37,5	12,6
2/12	127100	0,1373	17451	17,5	0,085	40,8	11,5
3/12	121800	0,1370	16687	16,5	0,089	35,9	12,9
4/12-6/12	134100	0,1371	18385	14,6*	0,086*	30,2*	10,8*
Medelvärde	125180	0,1368	17122	15,8	0,086	43,2	12,7

Appendix C



Figur 28. Regressionsanalys för andra ordning mellan SOTE och luftflöde per membran för hela bassängen och zon 2, vilket används som indata till Alphameteren.

Appendix D

Tabell 18. Reglerinställningar för syre- och luftregulatorerna för den konventionella regleringen av linje 6 och linje 7 på Himmerfjärdsverket. Båda regulatorerna är PID-regulatorer

	Parameter	Värde	Enhet	Förklaring
Syreregulator				
	K	0,350	-	Förstärkning
	I	300	Sekunder	Intergrationstid
	D	50	Sekunder	Deriveringstid
	T	300	Sekunder	Samplingstid
	Xmin	1	mg/l	DO min
	Xmax	10	mg/l	DO max
	Ymin	1700	Nm ³ /h	Luftbörvärde min
	Ymax	8000	Nm ³ /h	Luftbörvärde max
Luftregulator				
	K	0,100		Förstärkning
	I	100		Intergrationstid
	D	0		Deriveringstid
	T	300		Samplingstid

Appendix E

Beräkningarna för andelen omvandlad ammoniumkväve baseras på dygnsmedelvärde hämtad från NXW. Vattenflödet Q_i (m³/d) till respektive linje beräknades enligt

$$Q_i = \frac{N_i}{\sum_{i=1}^{i=8} N_i} \times Q_{tot} \quad (24)$$

där i motsvarar linje 1-8, N_i (mm) är vattennivån i linje i och Q_{tot} (m³/d) är det totala vattenflödet till alla linjer. Mängden totalt inkommande och utgående ammoniumkväve, $C_{i,totNH_4}$ (kg/d) och totalt organisk kol $C_{i,totTOC}$ (kg/d) beräknades enligt

$$C_{i,totNH_4} = Q_i \times C_{i,NH_4} \times 10^{-3} \quad (25)$$

$$C_{i,totTOC} = Q_i \times C_{i,TOC} \times 10^{-3} \quad (26)$$

där C_{i,NH_4} och $C_{i,TOC}$ är dygnsmedelvärdet (mg/l) för respektive linje på inkommande och utgående vatten. Förändringen R (%) av respektive ämne beräknades enligt

$$R_{i,NH_4} = \frac{C_{i,totNH_4in} - C_{i,totNH_4ut}}{C_{i,totNH_4in}} \times 100 \quad (27)$$

$$R_{i,TOC} = \frac{C_{i,totTOCin} - C_{i,totTOCut}}{C_{i,totTOCin}} \times 100 \quad (28)$$

Mängd luft per kilo omvandlad ammoniumkväve V_i (Nm³/kg NH₄-N) beräknades enligt

$$V_i = \frac{Q_{i,luft}}{C_{i,totNH_4in} - C_{i,totNH_4ut}} \quad (29)$$

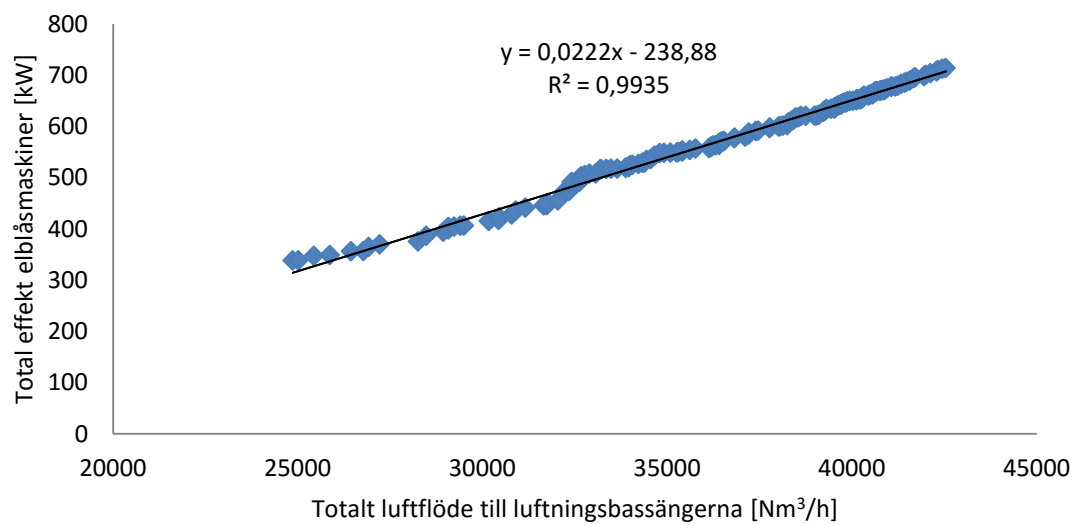
där $Q_{i,luft}$ (Nm³/d) är det totala luftflödet till linje i .

Mängden energi P (kWh) som krävs av elblåsmaskinerna för att producera mängden extra luft till respektive linje som inte gasmotorn klarar av att producera beräknades enligt

$$P = Q_{i,luft} \times k \times h \quad (30)$$

där $Q_{i,luft}$ (Nm³/h) är medelvärdet per timme för hela perioden, $k = 0,02$ (kWh/Nm³) enligt ekvation (23), h är totala antalet timmar som elblåsmaskinen var i bruk (1 period=168 h).

Appendix F



Figur 29. Sambandet mellan tillförd luft från de eldrivna blåsmaskinerna och energin som förbrukas. Sambandet gäller för period 1 och 2.