

Implementering och utvärdering av ammoniumåterkoppling i fullskala



Linda Åmand

Författare: Linda Åmand, IVL Svenska Miljöinstitutet

Medel från: Svenskt Vatten Utveckling, Stiftelsen IVL, Stockholm Vatten, Käppalaförbundet, Syvab

Fotograf: Linda Åmand

Rapportnummer: B 2200

Upplaga: Finns endast som PDF-fil för egen utskrift

© IVL Svenska Miljöinstitutet 2015

IVL Svenska Miljöinstitutet AB, Box 210 60,100 31 Stockholm

Tel: 08-598 563 00 Fax: 08-598 563 90

www.ivl.se

Rapporten har granskats och godkänts i enlighet med IVL:s ledningssystem

Förord

Denna rapport sammanfattar de praktiska resultaten och erfarenheterna från ett fyraårigt doktorandprojekt, vars syfte varit att minska energiförbrukningen i luftningsprocessen på kommunala reningsverk med hjälp av reglerteknik. Målgruppen för rapporten är personal på reningsverk och konsulter som vill veta mer om hur implementerings- och utvärderingsarbetet kan gå till när man ändrar reglerstrategier på avloppsreningsverk. Läsaren bör ha grundläggande kunskaper i reglerteknik och biologisk kväveavskiljning.

Arbetet med rapporten är finansierat av ett forskningsprojekt inom VA-kluster Mälardalen som genomförts med stöd från Stockholm Vatten, Käppalaförbundet och Syvab. Projektet samfinansieras med medel från Stiftelsen IVL via medel från Naturvårdsverket och Formas samt Svenskt Vatten Utveckling (projekt 29-116 och projekt 12-123).

Jag vill tacka forskningsprojektets projektgrupp: Christer Laurell, Stockholm Vatten, Andreas Thunberg, Käppalaförbundet och Kristina Stark-Fujii, Syvab. Tack för ert och era kollegors engagemang och alla diskussioner vi haft under åren som gjort denna rapport möjlig. Bengt Carlsson, professor i reglerteknik vid Uppsala universitet och doktorandhandledare, förtjänar ett stort tack för inspiration och nära samarbete under fyra års tid. Under åren har flera examensarbetare varit delaktiga i att arbeta fram materialet i denna rapport. Tack till Åsa Nordenborg, Elin Åfeldt, Linda Wiig och Sofia Andersson. Som inspirationskällor och bollplank från den internationella arenan vill jag även tacka Pernille Ingildsen (Kalundborg Forsyning, Danmark) och Leiv Rieger (inCTRL Solutions Inc., Kanada). Stort tack till Prof. em. Gustaf Olsson vid Lunds universitet för stöd och inspiration i arbetet.

Vissa delar av rapporten är ett nytryck av *Water Science and Technology* volym 69, utgåva 7, sidorna 1573 – 1580, med tillstånd från upphovsrättsinnehavarna, IWA Publishing.

Innehållsförteckning

Förord.....	3
Sammanfattning	5
Summary	6
1 Rapportens upplägg	7
2 Introduktion till ammoniumåterkoppling	7
3 Mål med ändring av styrstrategi.....	9
4 Implementera ammoniumåterkoppling.....	10
4.1 Styrsystemet	10
4.2 Mäta ammonium.....	12
4.3 Val av regulatorparametrar	12
5 Utvärdering av ammoniumåterkoppling	15
5.1 Uppföljning av försöken	15
5.2 Tidsperspektiv.....	17
5.3 Korrelationer i data.....	17
5.4 Kostnad mot nytta.....	18
6 Exempel från fullskaleförsök	21
6.1 Henriksdals reningsverk, Käppalaverket och Himmerfjärdsverket	21
6.2 Försöksupställning	22
6.2.1 Val av regulatorparametrar	24
6.3 Sammanfattning av försöksmetoden	24
6.4 Utvärderingsmetoder.....	26
6.4.1 Uppskattning av energiförbrukning.....	26
6.4.2 Kostnads-nyttoanalys	26
6.4.3 Hypotesprövning.....	26
6.5 Ammoniumregulatorernas beteende	26
6.6 Uppskattad energiförbrukning och kostnads-nyttoanalys.....	28
6.7 Implementering av ammoniumåterkoppling	30
6.7.1 Styrsystemet	30
6.7.2 Ammoniumgivare	31
7 Referenser.....	34

Sammanfattning

Ammoniumåterkoppling kan både bidra till en förbättrad kväverening och en minskad energiförbrukning på avloppsreningsverk med kväverening. Denna rapport sammanfattar erfarenheter från implementering och utvärdering av ammoniumåterkoppling på Henriksdals reningsverk, Käppalaverket och Himmerfjärdsverket under åren 2010 till 2014. Arbetet har gjorts i samarbete med Uppsala universitet.

De viktigaste budskapen från rapporten är att en PI-regulator som är korrekt implementerad och trimmad räcker långt, ha gott om tid för utvärdering och se till att utrustningen fungerar tillfredsställande samt kom ihåg att en ändrad reglering både medför kostnader och nyttor.

PI-regulatorn (proportionell-integrerande) är den vanligast förekommande regulatorn inom processindustri. En ammoniumregulator på ett reningsverk beräknar ofta ett börvärde till en annan regulator, vilket normalt är en syreregulator i biosteget på reningsverket. Detta skapar en s.k. kaskadkrets vilket ställer lite speciella krav på implementering och trimning av regulatorerna. Tänk också på att kväverening är en långsam process som behöver en långsam regulator. Ammoniumbörvärdet är ett viktigt hjälpmedel för att påverka vilket den genomsnittliga utgående ammoniumhalten blir, men man kan också använda den högsta och lägsta tillåtna syrehalten för att uppnå samma sak.

Om en utvärdering av och jämförelse mellan olika styrstrategier görs behövs gott om tid. Det första som man behöver göra är att gå igenom givare och annan utrustning för att se så att utrustningen fungerar som de ska. Ofta medför väderförhållanden, problem med utrustning eller slamproblem att försöken försenas. Ett års försök behövs på många verk för att få fram en representativ utvärdering mellan två styrstrategier p.g.a. skillnader mellan årstider.

En kostnads-nyttoanalys möjliggör en bättre jämförelse mellan styrstrategier än om man endast fokuserar på t.ex. skillnaden i energiförbrukning. Två viktiga faktorer som påverkar utfallet av en sådan för just ammoniumåterkoppling är hur stort verket är och behov av investering och underhåll av ny utrustning.

Ammoniumåterkoppling utvärderades under 8 till 12 månader på Henriksdals reningsverk, Käppalaverket och Himmerfjärdsverket. Energibesparingen var mellan 7 och 19 % och återbetalningstiden varierade mellan några månader och 4 år. Återbetalningstiden var som längst på den anläggning som hade störst energibesparing, men också stort behov av investering i ny utrustning.

Summary

Ammonium feedback control can contribute to improved nitrogen removal and reduced energy consumption at wastewater treatment plants with nitrogen removal. This report summarises lessons learned from implementation and evaluation of ammonium feedback control at Henriksdal, Käppala and Himmerfjärden waste water treatment plants (WWTPs) from the years 2010 until 2014. The work was conducted in collaboration with Uppsala University.

The three take home messages from this report are: *A correctly implemented and tuned PI-controller takes you far, make sure there is enough time available for evaluation and that the equipment is working satisfactorily and remember that a change in control strategy entails a change in both costs and benefits.*

The PI (proportional-integral) controller is the most frequently used controller within process industry. An ammonium controller at a WWTP often calculates a set-point to another controller, commonly a dissolved oxygen (DO) controller. This creates a cascade controller which provides some special requirements in terms of implementation and tuning. Also, remember that the nitrogen removal process is slow which calls for a slow ammonium controller. The ammonium set-point is an important tool to influence the average effluent ammonium concentration, but the DO limits can be used for the same purpose.

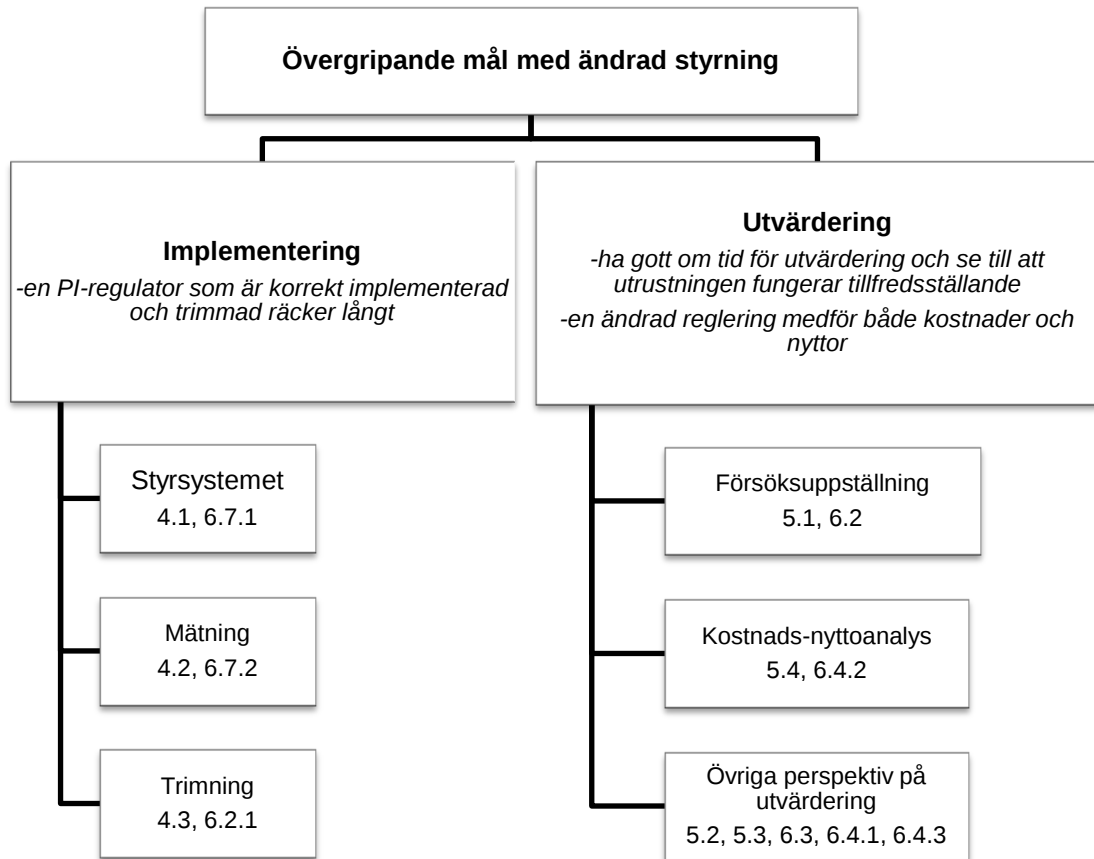
If an evaluation of and comparison between control strategies are performed, this requires time. The first thing to remember is to go through the equipment to make sure that sensors etc. operates well. Often, delays are caused in the evaluation due to bad weather, problems with the equipment or sludge quality problems. A one year comparison is required at many plants in order to have a representative evaluation between two control strategies, due to seasonal variations.

A cost-benefit analysis provides an improved comparison between control strategies than if the sole focus is on i.e. energy consumption. Two important factors which impacts the outcome of a cost-benefit analysis are how large the plant is and whether new equipment is required or not.

Ammonium feedback control was evaluated during 8 to 12 months at Henriksdal, Käppala and Himmerfjärden WWTPs. The energy saving in terms of air flow rate was between 7 and 19 % and the payback time varied from a couple of months up to 4 years. The payback time was longest at the plant with the largest energy saving, since the need for investments in new equipment was large.

1 Rapportens struktur

Rapportens struktur visas i Figur 1.1, där också de viktigaste budskapen från arbetet presenteras.



Figur 1.1. Rapportens upplägg med hänvisningar till avsnitt för olika delar.

2 Introduktion till ammoniumåterkoppling

Ett reningsverk utsätts för störningar och oväntade händelser. Det kan handla om att utrustning inte fungerar som den ska eller att belastningen till verket ändras. Processreglering handlar om att styra en process mot ett önskat mål, trots störningar. Med ammoniumåterkoppling kan regulatorn anpassa luftningsintensiteten till processens behov. Behovet av en varierad intensitet uppkommer eftersom belastningen in till ett reningsverk varierar över tid. Genom att mäta ammoniumhalten i processen kan en regulator beräkna ett varierande syrebörvärde som en syreregulator får i uppgift att upprätthålla.

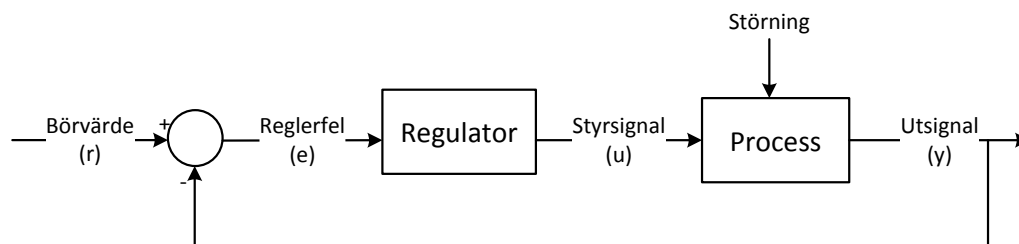
Ammoniumåterkoppling är en variant av ammoniumbaserad styrning där en ammoniumgivare används för att styra luftningsprocessen i ett reningsverk. Förutom återkoppling av ammoniumhalten kan man även använda framkoppling, där inkommande ammoniumhalt mäts för att i förväg reagera på en störning, t.ex. ett regn. Ammoniumbaserad styrning har i litteraturen visat sig kunna minska energiförbrukningen med

mellan 5 och 25 %, men det finns också exempel på när energiförbrukningen ökat som en effekt av förbättrad kväverening (Åmand, 2013).

Ammoniumbaserad styrning har förmågan att begränsa luftningsintensiteten under perioder då reningen fungerar bra och utgående ammoniumhalter är låga. På samma sätt kan luftningsintensiteten ökas då ammoniumhalten är hög. Skillnaden i styrförmåga mellan dessa två situationer är dock stor. Det finns egentligen ingen begränsning av hur lite kväve som kan nitrifieras i luftningsprocessen – i extremfallet kan luftningen stängas av. Däremot är nitrifikationskapaciteten vid höga syrehalter inte begränsad av just syrehalten, utan av den totala mängden nitrifierare i systemet.

Ett alternativ till att ändra luftningsintensiteten är att använda s.k. volymsreglering. Genom att börja lufta en tidigare oluftad zon kan man snabbt få en ökad nitrifikationskapacitet. Fler typer av reglerstrukturer för styrning av luftningsprocesser beskrivs i Åmand (2013).

Ammoniumåterkoppling är som det hörs på namnet en typ av återkoppling. Principen för återkoppling är att jämföra en mätning av utsignalen (den variabel man vill styra) med ett börvärde (det värde man önskar att utsignalen har). Ett exempel på en enkel återkopplingskrets visas i Figur 2.1.



Figur 2.1. Exempel på en återkopplingskrets.

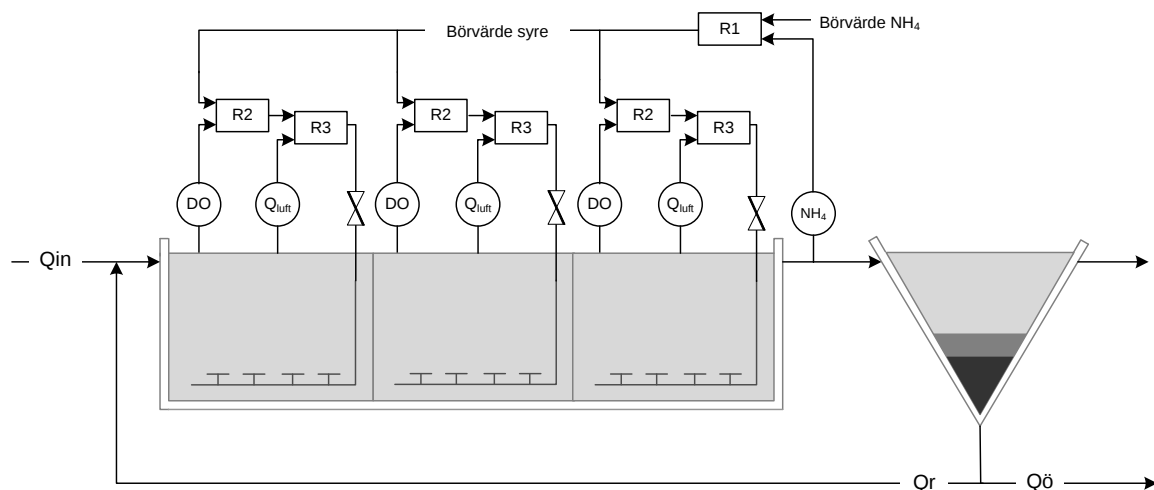
Det enklaste sättet att återkoppla ammoniumhalten är genom att använda s.k. on-off reglering. Det är det man använder vid volymsreglering, där en luftad zon stängs av/sätts på vid en lägre respektive högre ammoniumhalt. Man kan också tänka sig att luftningsintensiteten ändras i steg, där man antingen höjer eller sänker syrehalten vid en hög respektive låg ammoniumhalt. Den senare metoden kan grupperas inom den stora gruppen av regelbaserade regulatorer. Båda dessa metoder kan vara användningsbara för att få en avvägning mellan nitrifikation och denitrifikation i processen.

Ett alternativ till den snabba justeringen med on-off eller regelbaserad styrning ovan är kontinuerlig ändring av luftningsintensiteten genom en ändring i syrebörvärde i processen. Om man vill ha en kontinuerlig justering av syrebörvärdet är en PID-regulator att föredra. PID-regulatorn är den allra vanligaste regulatorn inom all processindustri (Åström & Hägglund, 1995). PID-regulatorn består av tre delar, se ekvation (1). En PID-regulator använder sig av reglerfelet vilket är skillnaden mellan börvärde och utsignal ($e = r - y$). Den proportionella delen (P) i regulatorn reagerar momentant på en förändring i reglerfelet. Den integrerande delen (I) summerar historiska reglerfel och den deriverande delen (D) reagerar på förändringshastigheten hos reglerfelet genom att beräkna derivatan av felet. Något förenklat kan man säga att den proportionella delen reagerar på reglerfelets beteende i *nutid*, den integrerande på beteendet i *dåtid* och den deriverande på uppskattat *framtida* beteende. Regulatorn kan även användas med endast P-, PI- eller PD- termerna. Det är ovanligt att man i processreglering behöver använda derivatadelen av regulatorn, en PI-regulator ger oftast god prestanda. En PID-regulators tre delar skrivs matematiskt på formen

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de}{dt} \right) \quad (1)$$

där $u(t)$ är styrsignalen (syreböörvärde i en ammoniumregulator), $e(t)$ är reglerfelet, d.v.s. $e(t) = r(t) - y(t)$, där $r(t)$ är böörvärdet och $y(t)$ är utsignalen, K är regulatorförstärkningen, T_i är integrationstiden och T_d är deriveringstiden. Notera att en större förstärkning eller längre deriveringstid ger en snabbare regulator.

PID-regulatorn används ofta vid kontinuerlig ammoniumåterkoppling. En ammoniumregulator interagerar då med flera underliggande regulatorer som ansvarar för syreregleringen. I Figur 2.2 beräknar en ammoniumregulator ett externt böörvärde till flera syreregulatorer medan syreregulatorn beräknar ett externt böörvärde till en luftflödesregulator. Luftflödesregulatorn beräknar ett önskat ventilläge, vilket ställs in av ställdonet. När flera regulatorer ligger på rad på detta vis kallas reglerstrukturen för kaskadreglering. I kaskadreglering ska den inre processen och därmed den inre regulatorn vara snabbare än den yttre processen och dess regulator. Den inre regulatorn kallas slavregulator, och den kommer att få ett externt böörvärde från den yttre masterregulatorn, som i sin tur kommer få ett internt böörvärde som operatören anger.



Figur 2.2. Exempel på en reglerstruktur med ammoniumåterkoppling. R1: ammoniumregulator, beräknar syreböörvärde till syreregulatorerna. R2: syreregulator: beräknar böörvärde till luftflödesregulatorn. R3: luftflödesregulator, beräknar ventilläget som ställs in av ställdonet. DO = löst syre (dissolved oxygen).

3 Mål med ändring av styrstrategi

Inför en ändring av styrstrategi är det viktigt att ha med sig varför man vill göra en ändring. En vanlig orsak till varför man vill övergå till ammoniumåterkoppling eller andra styrstrategier som förbättrar styrningen av luftningsprocessen är att minska energiförbrukningen (Åmand *et al.*, 2013). Andra ofta angivna mål inom forskningen är förbättrad reningen av ammonium eller totalkväve, bibehållen rening med minskad resursförbrukning, minskat behov av kolkälla, uppnå en säkrare drift eller minska kostnaderna för skatt/avgift på utsläpp (om sådana finnes). Ett annat motiv som nämnts är att uppnå något eller några av ovanstående mål men med så enkla medel som möjligt, d.v.s. att eftersträva att arbeta

med enkla regulatorer. På reningsverken är ett annat starkt motiv till att förändra styrningen att få en förenklad drift av processerna.

Oberoende av vad som är orsaken till att man implementerar ny reglerteknik, så är det viktigt att från början veta vad som är motivet bakom för att möjliggöra uppföljning och utvärdering av slutresultatet.

I arbetet som utförts tillsammans med Stockholm Vatten, Käppalaförbundet och Syvab och som ligger bakom slutsatserna från denna rapport var syftet att minska energiförbrukningen och underlätta driften av anläggningarna utan att påverka kvävereningen. Det fanns också ett önskemål om att undvika höga lustgasutsläpp, vilket inte diskuteras vidare i denna rapport. Samtliga tre reningsverk står även för skärpta utsläppskrav, där förutsättningen för att uppnå dessa kommer bli att uppnå mer eller mindre fullständig nitrifikation, vilket också kan vara ett motiv till att implementera ammoniumåterkoppling.

4 Implementera ammoniumåterkoppling

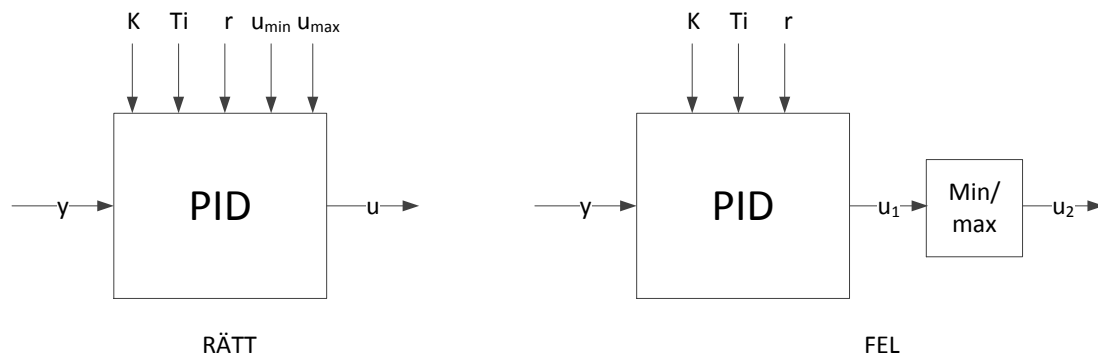
4.1 Styrsystemet

Idag har alla moderna styrsystem fördefinierade funktioner för PID-regulatorer, vilket underlättar arbetet med att implementera ammoniumåterkoppling i styrsystemet på ett avloppsreningsverk. När man implementerar ammoniumåterkoppling finns det ett par saker att tänka på för att få en smidig implementationsprocess och väl fungerande regulatorer. Erfarenheter från implementeringsarbetet med ammoniumåterkoppling på Henriksdals reningsverk, Himmerfjärdsverket och Käppalaverket sammanfattas nedan. Flera av punkterna kan även vara bra att tänka på vid implementering av andra typer av regulatorer än ammoniumreglering.

Förstärkningen i regulatorn ska vara negativ. Orsaken är att en ökad syrehalt ger en minskad ammoniumhalt. Om ammoniumhalten sjunker under sitt börvärde blir reglerfelet i regulatorn (börvärde minus utsignal) positivt. Är ammoniumhalten under börvärdet kan syrehalten sänkas. För att sänka syrehalten om reglerfelet är positivt behöver förstärkningen (K) vara negativ (se ekvation 1). I vissa styrsystem skriver man inte in en negativ förstärkning, utan man anger en positiv förstärkning och väljer regulatorn som *reverserad*.

Se till att integrationstiden får väljas fritt och med många värdesiffror. Integrationstiden i en process avspeglar processens snabbhet. En snabb process bör generellt ha en kortare integrationstid än en långsam process. Eftersom biologiska processer är långsamma behöver integrationstiden vara lång. Vissa styrsystem har begränsningar i valet av integrationstid. Det kan antingen bero på att man satt ett högsta värde på valet av integrationstid när PID-regulatorn programmerats, eller så beror det på en begränsning i användargränssnittet som gör att man inte har plats att skriva in tillräckligt många värdesiffror i rutan där man anger integrationstiden. En längre integrationstid ger en lugnare reglering och processen riskerar därmed inte att bli instabil. För att vara på den säkra sidan bör man kunna välja integrationstider upp till 99 999 s.

Använd alltid övre och undre begränsningar i styrsignalen. Alla styrsignaler bör kunna begränsas vid ett övre och undre värde och denna inställning ska göras inne i regulatorn (se Figur 4.1.) för att se till att regulatoruppvridning (se nedan) kan avhjälpas på rätt sätt. I vissa fall är en begränsning nödvändig eftersom styrsignalen annars skulle driva iväg till, för processen, för höga eller låga värden. Men även i fall där man vet med sig att en begränsning inte behövs i normal drift bör begränsningar föras in i styrsystemet som en säkerhetsåtgärd ifall t.ex. en givare skulle falla och få regulatorn att driva iväg.



Figur 4.1. Högsta och lägsta tillåtna värde på styrsignalen ska anges inuti regulatoren, inte utanför som till höger i figuren.

Implementering av kaskadreglering kan ge upphov till integratoruppvridning i masterregulatorn.

Integratoruppvridning (eng. *windup*) inuti en regulator kan uppkomma när regulatoren går i gräns, d.v.s. när den högsta eller lägsta begränsningen på styrsignalen. Om en integrerande regulator (t.ex. en PI- eller PID-regulator) får arbeta ostört kommer den fortsätta att för varje samplingstillfälle summera reglerfelet, trots att regulatoren tappat styrförmågan över processen. När väl regulatoren får tillbaka styrförmågan kan integraldelen i regulatoren vara så stor att det tar en lång tid innan styrsignalen lämnar sin högsta eller lägsta begränsning. I moderna regulatorer finns metoder för att se till så att integratoruppvridning undviks givet att begränsningen i regulatorns utsignal angivits inne i regulatoren (eng. *anti windup*).

Samma fenomen kan uppkomma i en kaskadkrets, så som den i Figur 2.2. Om en inre regulator i en kaskad går i gräns tappar hela kaskadkretsen sin styrförmåga. En yttre integrerande regulator riskerar då att fortsätta att summera reglerfelet, och integratoruppvridning uppstår i den yttre regulatoren. Precis som integratoruppvridning i enskilda regulatorer finns det sätt att hantera integratoruppvridning i kaskadreglering i moderna industriella styrsystem. Risken för integratoruppvridning i en ammoniumregulator är trots allt liten, risken är betydligt större i en syrerregulator. I avsnitt 6.7.1 beskrivs detta närmare.

Var tydlig i implementering av kaskadreglering. För att förenkla övervakning och styrning av processen är det bra om operatören kan se vilka regulatorer som ingår i en kaskadkrets. Man kan med fördel visa både att de enskilda slavregulatorerna får ett externt istället för internt börvärde och vilken regulator som beräknar det externa börvärdet.

Använd inte deriveringsdelen. Att använda deriveringsdelen i regulatorer i processindustri är ovanligt. Detta har att göra med att processerna är tillräckligt enkla för att en PI-regulator ska kunna göra sitt jobb. Det finns även risker med att använda en deriveringsdel i regulatoren. Eftersom derivatan är känslig för snabba förändringar i reglerfelet blir en D-regulator bruskänslig. Ett vanligt sätt att hantera detta på är genom att filtrera utsignalen. Då får man inte bara en extra parameter (T_d) att välja i en deriveringsdel, utan även en filterparameter. Därför ger en deriveringsdel i en PID-regulator oftast en onödigt komplicerad regulator med två extra användarparametrar. För ammoniumreglering räcker en P eller PI-regulator för att uppnå goda resultat. Nackdelen med en P-regulator är att den aldrig uppnår sitt börvärde. Men i sammanhang av ammoniumreglering gör processförhållanden att man sällan gör det med en PI-regulator heller.

Var medveten om hur regulatorn är implementerad. En PID-regulator kan rent matematiskt implementeras på olika sätt i ett styrsystem. Den version som är presenterad i ekvation 1 är på *standardform*, vilket är den vanligaste versionen inom industrin. I en regulator på standardform kommer valet av regulatorförstärkning påverka alla regulatorns delar, eftersom hela uttrycket multipliceras med förstärkningen K . Regulatorn kan även vara implementerad på *parallell form* där valet av förstärkning endast påverkar regulatorns proportionella del.

En annan aspekt som har att göra med hur regulatorn är implementerad är vilken typ av enheter regulatorn arbetar med. Räknar den i ingenjörsenheter eller procentenheter? Det vanligaste är att den räknar i procentenheter. Det är lätt att omvandla det ena till det andra:

$$y_{\%} = 100 \frac{y_{ing}}{y_{\max} - y_{\min}} \quad (2)$$

där $y_{\%}$ är processens utsignal i %-enheter av mätområdet, y_{ing} är processens utsignal i ingenjörsenheter, $y_{\max} - y_{\min}$ anger givarens mätområde.

Använd rimliga mätområden för givarna. Det är en fördel att arbeta med logiska mätområden för givarna, så väl för luftflödesgivare som syregivare och ammoniumgivare. T.ex. är det användbart att för en syregivare låta mätområdet vara 0 till 10 mg/l, vilket innebär att 100 % motsvaras av 10 mg/l. Om mätområdet är betydligt större än mätsignalens spann ger en förändring i mätsignalen upphov till en liten förändring i %-enheter.

Se över behörigheter i styrsystemet. Det finns både ett behov av att bestämma hur man vill utveckla systemet och utföra större ändringar i t.ex. den grafiska presentationen, men också ett behov av att utföra regelbundna uppdateringar av inställningarna i regulatorerna. Reningsverken i Sverige har löst behörighetsfrågan på olika sätt i sina styrsystem. Vissa har all utveckling internt inom den egna organisationen medan andra låter den mer avancerade utvecklingen ligga på konsulter. Valet har ofta att göra med hur man arbetar med olika kompetensområden inom den egna organisationen och hur stor organisationen är. Hur behörigheterna i systemet ser ut kommer påverka hur snabbt och tillgängligt systemet är då ändringar behöver göras.

4.2 Mäta ammonium

Idag finns det jon-selektiva on-linegivare för ammonium från flera tillverkare på marknaden. Man kan också installera en analysator, som generellt sett har en bättre noggrannhet än on-lineinstrumenten men som också kostar mer.

Det är viktigt att tänka på var man placerar givaren eller analysatorn. Det bästa är om mätutrustningen kan vara placerad så nära luftningsprocessen som möjligt eftersom en placering nedströms i processen ger upphov till en tidsfördröjning i signalen, se vidare avsnitt 6.5 och 6.7.2. Samtidigt kan luftningsprocessen vara en tuff miljö att mäta i vilket kan påverka behovet av underhåll av en on-linegivare.

4.3 Val av regulatorparametrar

En enkel men effektiv ammoniumregulator kan väljas som en PI-regulator med en lägsta och högsta begränsning i styrsignalen (syrebörvärdet). Detta kan illustreras matematiskt som:

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \right), u(t) = \begin{cases} u_{\min} & \text{om } u(t) < u_{\min} \\ u_{\max} & \text{om } u(t) > u_{\max} \end{cases} \quad (3)$$

där $u(t)$, $e(t)$, K och T_i definieras som i ekvation (1) och $u_{\min}$ och $u_{\max}$ är det lägsta och högsta tillåtna värdet på styrsignalen, d.v.s. det lägsta och högsta tillåtna syrebörvärdet.

För en regulator implementerad formen presenterad i ekvation (3) handlar det alltså om att bestämma

- ammoniumbörvärde ($r(t)$),
- lägsta och högsta begränsning i syrebörvärde ($u_{\min}$ och $u_{\max}$),
- regulatorförstärkning (K) och
- integrationstid (T_i).

Valet av *ammoniumbörvärde* görs baserat på hur kvävereningen på reningsverket fungerar. Ett lägre ammoniumbörvärde kommer att höja syrehalterna i processen och sänka den genomsnittliga ammoniumhalten. Ofta är det inte möjligt för processen att över tid uppnå det önskade ammoniumbörvärdet. Orsaken är att luftningsintensiteten bara delvis påverkar hur mycket ammonium som nitrifieras. Utgående ammoniumhalt beror också på faktorer som inkommande belastning, slamålder och temperatur. En ammoniumtopp kan förstärkas av låga syrehalter, men den kan ofta inte helt reduceras trots höga syrehalter. På samma sätt kan man inte alltid minska luftningsintensiteten så mycket att man höjer en låg utgående ammoniumhalt till börvärdet. Därför kommer ammoniumbörvärdet inte att vara den ammoniumhalt man verkligen får i processen – halten kan både bli högre eller lägre än börvärdet beroende på hur kvävebelastningen varierar och beroende på hur lång tidsperiod man utvärderar. Istället kan ammoniumbörvärdet betraktas som en *switch* som påverkar när syrehalten ska höjas och sänkas. Många on-line ammoniumgivare har svårt att mäta noggrant under ca 1 mgNH₄/l. Det kan därför vara klokt att inte välja börvärdet lägre än detta i börvärde.

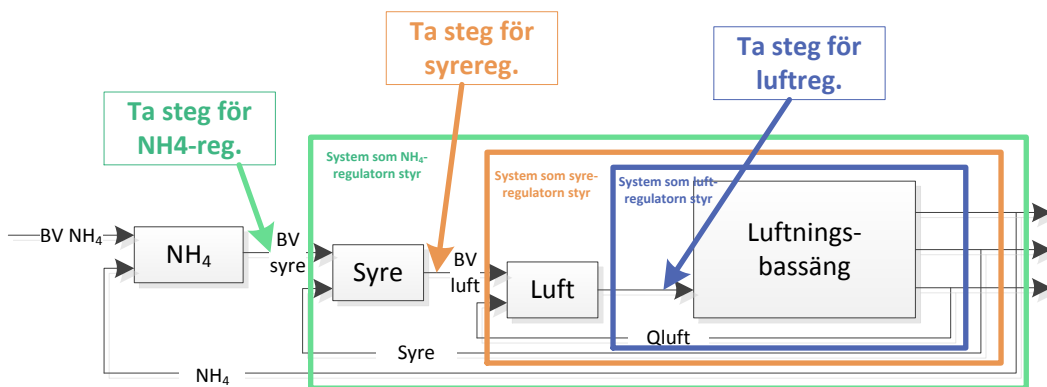
Den *lägsta och högsta begränsningen i syrebörvärde* kommer precis som ammoniumbörvärdet att påverka den genomsnittliga utgående ammoniumkoncentrationen. Luftningssystemet har en lägsta begränsning på hur mycket luft som släpps in i bassängerna. Om membranbottenluftare används behöver dessa ett lägsta tillåtet luftflöde för att inte sätta igen. Det kan dessutom finnas processmässiga skäl att inte sänka syrehalten för mycket trots att utgående ammoniumhalt är nära noll. Det kan föreligga en ökad risk för produktion av lustgas i processen (Kampschreur *et al.*, 2009) eller risk för en negativ påverkan på slamkvaliteten (Martins *et al.*, 2004). Den högsta syrehalten bör väljas till den nivå där det är troligt att en ytterligare ökning av syrehalten har en försumbar effekt på nitrifikationen. Denna gräns kan vara olika på olika reningsverk. Vid högre syrehalter kommer mer syre tränga in i flockarna, men det finns en gräns då nitrifikationshastigheten endast påverkas till en liten grad av en ökning i syrehalt. Eftersom höga syrehalter och därmed höga luftflöden är ineffektiva (Åmand, 2013) bör dessa undvikas om möjligt.

Både vilka syrehalter som bör tillåtas för att undvika onödig lustgasavgång eller negativ påverkan på slamkvaliteten och vilken syrehalt som är rimlig att ha som övre gräns i regulatorn kräver processkunnskap. Är man osäker är det bättre att välja högre syrehalter som högsta och lägsta nivå och därefter sänka begränsningarna i steg. En risk med att ha en hög lägsta syrehaltsbegränsning i den sista luftade zonen i en fördenitrifikationsprocess är att höga syrehalter recirkuleras och stör denitrifikationsprocessen.

Det finns många sätt att välja regulatorparametrarna K och T_i i en PI-regulator. Man brukar tala om *reglerdesign* eller *regulatortrimning*. Som operatör kan du välja mellan att trimma regulatorn med tumregler eller enkla experiment, alternativt att beräkna regulatorparametrar med hjälp av en matematisk modell över processen. Även tumreglerna bygger på enkla matematiska modeller, och genom experiment tar man fram uppgifter om modellens egenskaper.

En vanlig tumregel-metod inom processindustrin är *lambdatrimning*. Liksom andra metoder bygger lambda-trimningen på ett s.k. *stegsvarsexperiment*. Under ett stegsvarsexperiment sätter man regulatorn i manuellt läge (d.v.s. operatören väljer styrsignalens värde) och väntar tills utsignalen stabiliserat sig. Därefter tar man ett steg i styrsignalen och väntar återigen på att utsignalen stabiliserats. Slutligen tar man ett lika stort steg i motsatt riktning och går tillbaka till automatiskt mode efter att utsignalen återigen är stabil. Baserat på stegsvarets utseende kan man med bl.a. lambdametodens hjälp räkna fram inställningar på regulatorparametrarna. Läs mer om lambdatrimning i Carlsson & Hallin (2010).

När stegsvarsexperiment utförs i en kaskadkrets är det viktigt att börja trimma den innersta regulatorn i kretsen, så att de yttre kretsarna sedan styr en vältrimmad inre reglerkrets när det är dags för deras trimning. Figur 4.2 visar var steget ska tas för trimning av de tre regulatorerna i en trippelkaskad för ammoniumstyrning.



Figur 4.2. När en regulator ska trimmas med hjälp av ett stegsvarsexperiment ska steget göras i regulatorns styrsignal. Figuren visar var steget ska tas för trimning av ammoniumregulator, syreregulator och luftflödesregulator.

Utmaningen med att trimma en ammoniumregulator ligger i hur långsamt den biologiska reningen svarar på en förändring i syrehalt. Att utföra ett stegsvarsexperiment för en syreregulator kan ta upp till 30 minuter inklusive väntetider. Bara under denna tid kan processen störas och experimentet behöver avbrytas och göras om. I fallet med ammoniumregulatorn behövs experiment där syrebörvärdet varieras. Men en respons på utgående ammoniumhalt efter en ändring i syrehalten kan dröja flera timmar. Sannolikheten är stor att utgående ammoniumhalt hunnit ändras under denna tid som ett resultat av ändrad belastning, vilket gör att försöket måste avbrytas.

Ett alternativ till att använda manuell trimning eller trimning med hjälp av tumregler är att låta styrsystemet beräkna regulatorparametrarna genom *automatisk trimning* (eng. *auto tuning*). Då utför styrsystemet experiment på processen och beräknar regulatorparametrarna med hjälp av en enkel processmodell. Samma problem kommer dock uppstå vid automatisk inställning av parametrarna som vid trimning med tumregler då stegsvarsexperiment används: processens respons på en förändring i syrehalt är långsam och risken för störningar under experimentet är stor.

Vill eller kan man inte använda tumregler eller automatisk inställning vid regulatortrimning är det brukligt att börja med att höja förstärkningen (K) tills man får önskad snabbhet och under tiden hålla integrationstiden väldigt lång. Därefter kan man minska integrationstiden, T_i , tills man får önskad prestanda. Nackdelen med detta tillvägagångssätt är att det kan ta lång tid och det finns en hel del godtycke i "önskad snabbhet" och "önskad prestanda" och det kräver kunskap om processens dynamik. Det finns inget entydigt svar på hur detta bör gå till. Nedan listas två typer av situationer som kan uppkomma för just ammoniumåterkoppling och som kräver olika val av regulatorparametrar.

Snabb reglering: Om reningsverket har dygnsvisa variationer i utgående ammoniumhalt med en ammoniumtopp under högbelastning kan ammoniumregulatorn anpassa syrehalten till dessa variationer. Det kräver en relativt snabb regulator tillsammans med en ammoniumgivare som är placerad i aktivslamprocessens sista luftade zon. Om mätområdet för syre och ammonium är detsamma (t.ex. om 0 till 10 mg/l motsvarar 0 till 100 % av mätområdet för både syre och ammonium) är ett bra första val av förstärkning runt 0,5. Om inte mätområdet är detsamma får en korrigering av regulatorförstärkningen K göras i enlighet med:

$$K = K_{1:1} \frac{syre_{max} - syre_{min}}{ammonium_{max} - ammonium_{min}} \quad (4)$$

Där K är den omräknade förstärkningen då mätområdet inte är detsamma för ammonium och syre, $K_{1:1}$ är den önskade förstärkningen om mätområdet är samma och $syre_{max} - syre_{min}$ och $ammonium_{max} - ammonium_{min}$ representerar mätområdet för syre- respektive ammoniumsignalerna.

Integrationstiden bör som startgissning väljas över 1000 s. Därefter kan förstärkningen höjas och integrationstiden sänkas. Integrationstiden bör inte väljas under 500 s.

Långsam reglering: Ett alternativ till en snabb regulator är en regulator som justerar syrehalten långsamt över tid. Det blir ett glidande syrebörvärde som anpassar syrehalten baserat på det långsiktiga värdet på ammoniumhalten. En orsak till att vilja använda en långsam reglering kan vara att ammoniumgivaren är placerad efter sedimenteringen i biosteget, se vidare avsnitt 6.5. En långsam reglering är relativt förlåtande att trimma. Det viktiga är att regulatorn ska ha en väldigt låg förstärkning och lång integrationstid. Om regulatorn är implementerad på standardform, så kommer en sänkning av förstärkningen ge en långsammare proportionell del i regulatorn, men också en långsammare integraldel. En nackdel med en långsamt integrerande regulator är att regulatorn tar lång tid på sig att sänka syrebörvärdet efter en ammoniumtopp. Detta beteende kan delvis korrigeras genom att införa en regulator med så kallad parameterstyrning (Eng gain scheduling), se Carlsson & Hallin (2010).

5 Utvärdering av ammoniumåterkoppling

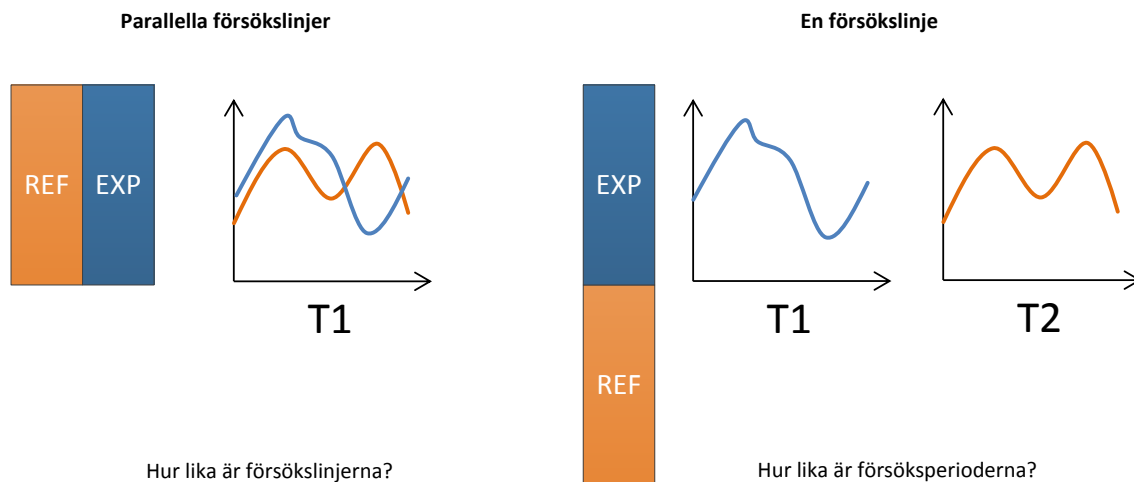
5.1 Uppföljning av försöken

De tre viktigaste orsakerna till att mäta under ett experiment där syftet är att jämföra styrstrategier i en luftningsprocess är att kunna styra processen, att kunna kvantifiera skillnader mellan de olika styrstrategierna, och att se till så att processen klarar de krav som den behöver uppnå.

Inför en utvärdering av ammoniumåterkoppling är det viktigt att gå igenom alla givare och ställdon och se så att de fungerar som de ska. Använd massbalanser för att se så att flödesgivare och slamhaltsgivare visar rimliga värden. Jämför parallella linjer med varandra för att se så att luftflödesgivarna är jämförbara. Just

luftflödesgivarna är extra viktiga eftersom de är ett mått på energi. Det är viktigt att tänka på syregivarnas placering, så att de mäter så representativt som möjligt. Inspiration till hur man kan gå till väga för att gå igenom givare och annan utrustning finns att hitta i Rieger et al. (2010).

En jämförande studie mellan två reglerstrategier kan antingen utföras i två eller flera parallella försökslinjer under samma tidsperiod, eller i en och samma försökslinje men under två olika tidsperioder (Figur 5.1). Om en jämförelse görs mellan parallella linjer är det viktigt att vara uppmärksam på systematiska skillnader mellan linjerna. Det kan handla om att utrustningen är olika gammal, t.ex. luftarmembran med olika ålder, att belastningen in till linjerna är olika eller att linjerna har olika slamålder. Om flera olika tidsperioder används är det viktigare att perioderna är så lika som möjligt, eftersom försökslinjen är detsamma. Inkommande belastning kommer påverka hur effektivt reningen sker varför detta är en viktig faktor när olika tidsperioder jämförs, se vidare avsnitt 5.3.



Figur 5.1. Parallella försökslinjer eller en försökslinje? Olika uppställningar ger upphov till olika frågeställningar.

Om instrumentering och provtagning tillåter kan man beräkna AOR (actual oxygen requirement, kgO_2/d) antingen in till två parallella försökslinjer med olika belastning, eller in till en försökslinje under två olika försöksperioder. Från AOR kan sedan effektivitetsparametrar så som SOTE (standard oxygen transfer efficiency, kgO_2/d) och SAE (standard aeration energy, kgO_2/kWh) beräknas. Med AOR kan man kompensera för en skev inkommande belastning vid försöken. Nackdelen är att det krävs mycket provtagning och provhantering om försöken pågår under lång tid. Både inkommande och utgående vatten från varje försökslinje behöver analyseras med avseende på kolinnehåll och kvävefraktioner. Ett exempel på hur dessa beräkningar utförts på ett svenskt reningsverk finns väl beskrivet i Larsson (2011).

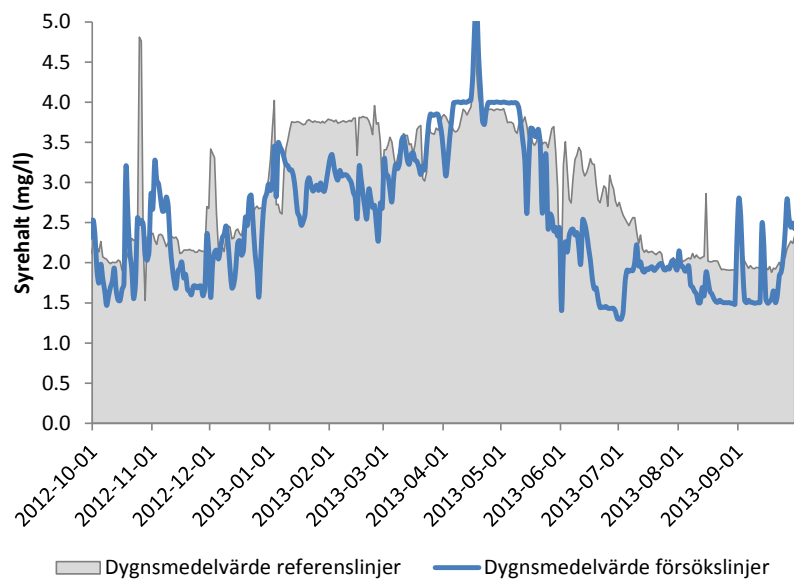
Om luftflödesgivarna är det främsta sättet att mäta energiförbrukning på behöver reningsverket ha ett linjärt förhållande mellan luftåtgång och effektförbrukning. Om energikostnaden är viktig och inte bara själva energiförbrukningen behöver elpriset vara lika högt alla delar av dygnet, även vid effekttoppar. Om en varierande prismodell används behöver detta kompenseras för i beräkningarna.

5.2 Tidsperspektiv

Under hur lång tid bör man utvärdera ammoniumåterkoppling, eller för den delen andra processförändringar på ett reningsverk? Här är det användbart att resonera i termer av cykler. Det finns tre huvudsakliga cykler på ett reningsverk: dygn, vecka och år. Att täcka in en dygns- eller veckocykel i ett försök med regulatorer kan vara användbart för att se hur en regulator reagerar på kortvariga störningar. Men från energisynpunkt är den viktigast att kunna täcka in årsvariationer. Det är skillnad i besparingspotential till följd av ammoniumåterkoppling under årets olika årstider.

Ett exempel på hur energibesparingen varierar under ett år på Henriksdals reningsverk visas i Figur 5.2. Här jämförs syrehalten vid ammoniumåterkoppling (försökslinjer) och vid styrning med konstanta syrehalter (referenslinjer). Förutom skillnader under olika årstider, så visar Figur 5.2 att en viktig orsak till att skillnaden mellan försökslinjer och referenslinjer varierar under året är hur operatörerna ändrat syrebörvärdet i referenslinjerna. Om operatörerna ändrat syrebörvärdet mer sällan hade referenslinjernas syrehalter legat mer konstant under längre perioder. Om en period på 1-2 månader valdes ut under det året som visas i Figur 5.2 är risken stor att utvärderingen inte blivit representativ för hela året.

Under försöken på Käppalaverket bidrog ammoniumåterkoppling med en konsekvent sänkning av den genomsnittliga syrehalten på mellan 0.7 och 0.8 mg/l, förutom under snösmältningsperioden. Under sådana omständigheter kan en representativ uppskattning av energiförbrukningen uppnås under en kortare period än ett år.



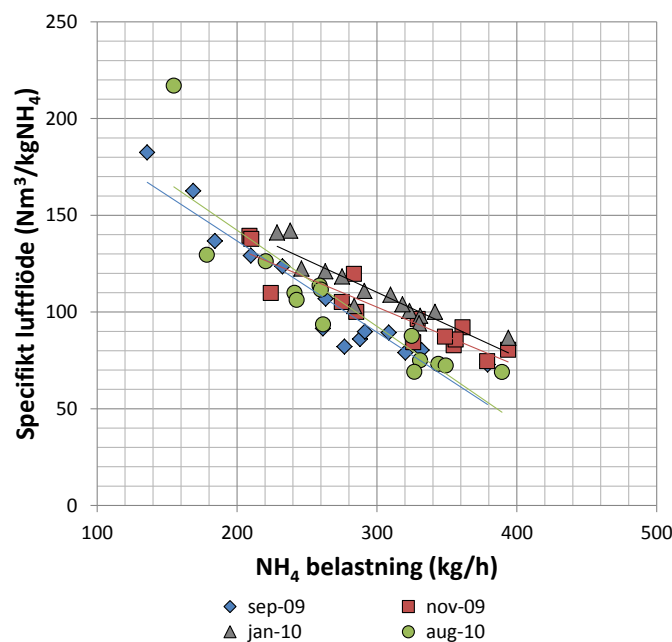
Figur 5.2. Energibesparingen med ammoniumåterkoppling varierar över året. Figuren visar dygnsmedelvärde på syrehalten i försökslinjer och referenslinjer under försöken med ammoniumåterkoppling på Henriksdals reningsverk (se avsnitt 6).

5.3 Korrelationer i data

Huvudsyftet med att jämföra energiförbrukning för olika reglerstrategier är att endast kvantifiera skillnader som uppkommer som ett resultat av valet av styrstrategi. Variationer i omgivningsfaktorer vill

man egentligen kunna bortse ifrån. Detta kan vara svårt eftersom miljön i en luftningsbassäng ändras över tid. I den bästa av världar har man samma inflöde, slamhalt, reningsgrad, temperatur m.m. under försöken. Eftersom detta sällan är fallet kan det vara lockande att normera med t.ex. slamhalt eller reningsresultat när energiförbrukningen för två påföljande perioder jämförs. Genom att göra detta riskerar man att utvärdera samband i processen som inte är kopplade till valet av reglerstrategi.

Ett exempel på en sådan korrelation visas i Figur 5.3. Den specifika luftförbrukningen, d.v.s. luftförbrukningen normerat med mängden renad ammonium, ökar då belastningen till reningsverket minskar. Det kostar relativt mer att rena mindre kväve. Om man utvärderar en reglerstrategi vid två tillfällen som har olika belastningar kommer det specifika luftflödet variera inte bara som ett resultat av vald reglerstrategi, utan också som ett resultat av att belastningen är annorlunda.



Figur 5.3. Specifikt luftflöde som funktion av ammoniumbelastningen på Henriksdals reningsverk under två varma och två kalla månader.

5.4 Kostnad mot nytta

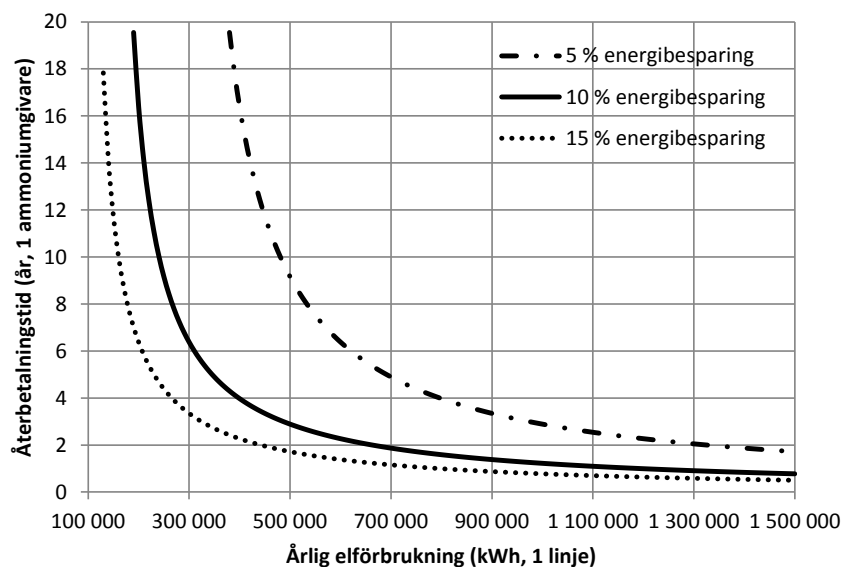
Ammoniumåterkoppling kan spara energi på ett reningsverk och bidra till mer robust styrning som kräver mindre handpåläggning från operatören. Men ammoniumåterkoppling kostar också pengar och tid. Om reningsverket sedan tidigare investerat i en on-line mätare för ammonium som kan användas för styrning tillkommer endast kostnader för programmering av styrsystemet, och det är lönsamt att redan vid liten energibesparing implementera ammoniumåterkoppling. Om en ammoniumgivare eller annan utrustning behöver köpas in tillkommer kostnader för inköp och underhåll av utrustning. Denna kostnad behöver då ställas mot vilken nytta som ammoniumregleringen tillför.

Nyttor som en följd av energibesparing, ökad robusthet samt förenklad drift för operatören är svåra att värdera i kronor och ören. Fullskaleförsöken som presenteras i avsnitt 6 samt ett stort antal datorsimuleringar (Åmand, 2014) har visat att energibesparingen med ammoniumåterkopplingen är som mest ca 10 % jämfört med att styra verket med konstanta syrehalter som operatören anger, om man

samtidigt är mån om att ha en likvärdig nitrifikation som innan. Kan man tänka sig att öka utgående ammonium lite kan energibesparingen hamna uppåt 15 %. En större energibesparing än 10 % med likvärdig nitrifikation kan också uppnås om jämförelsen görs mot en mindre energieffektiv styrstrategi än styrning med konstanta syrehalter. I dessa lägen tillkommer ofta en högre kostnad för utrustning, se vidare avsnitt 6.4.2.

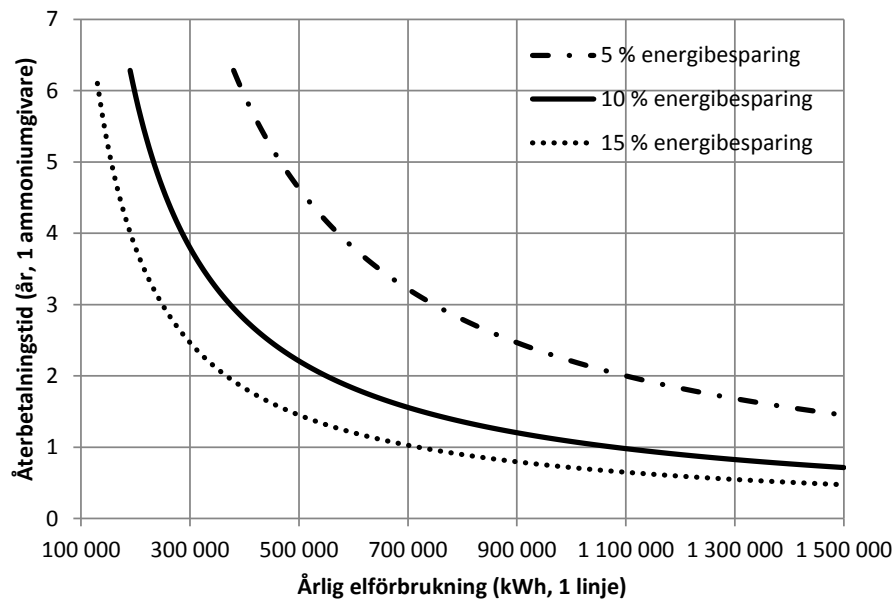
Hur stor energibesparingen kan bli beror inte bara på energibesparingens storlek, utan också på hur stor energiförbrukningen var från början. Om en ammoniumgivare installeras för att styra syrebörvärdet till ett antal luftade zoner på ett reningsverk, kommer kostnads-nyttoanalysen påverkas av linjens storlek. Ju högre luftförbrukningen är i linjen, desto snabbare går det att räkna hem en investering i en ammoniumgivare som gjorts för att införa ammoniumåterkoppling.

Detta illustreras i Figur 5.4. Återbetalningstiden har beräknats för en kalkylränta på 4 %. Energibesparingen har antagits vara mellan 5 och 15 % och det ursprungliga effektbehovet visas på x-axeln. 1 kWh har antagits kosta 1 kr, och det antogs föreligga ett linjärt förhållande mellan luftflöde och energiförbrukning i blåsmaskinerna. Kostnaden för en ammoniumgivare antogs vara 75 000 kr och installationskostnader motsvarande 25 % av givarens pris antogs tillkomma. Kostnaden för årligt underhåll beräknades från antagandet att givaren behövde 0,5 timmars underhåll per vecka. Kostnader för programmering i styrsystemet antogs vara 10 000 kr. visar att ju högre ursprunglig effektförbrukning för en linje i verket, desto kortare blir återbetalningstiden för införande av ammoniumåterkoppling.



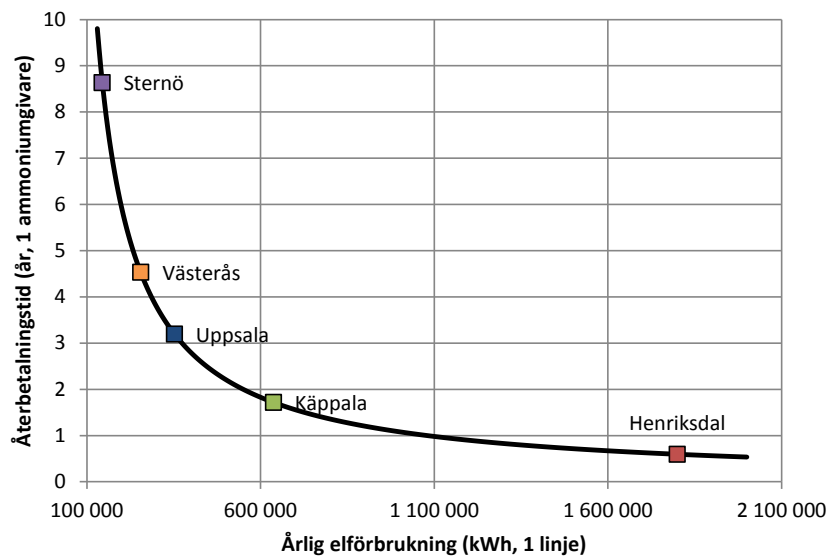
Figur 5.4. Återbetalningstiden för implementering av ammoniumåterkoppling blir längre när en linje som styrs med ammoniumåterkoppling är mindre. En mindre linje har en lägre årlig elförbrukning vilket leder till en relativt sett lägre årlig besparing.

Notera att förbättrad robusthet mot störningar och minskat behov av tid för operatören inte är inkluderat i kostnads-nyttoberäkningen i Figur 5.4. Om man antar att ett ökat behov av underhåll av ammoniumgivaren kompenseras av ett minskat behov av tid för processövervakning av operatören blir återbetalningstiden betydligt kortare (Figur 5.5). Detta visar på vilken påverkan tid för underhåll av givare kan ha på en kostnads-nyttoanalys av en styrstrategi.



Figur 5.5. Återbetalningstiden blir betydligt kortare om ett ökat underhållsbehov kvittas mot ett minskat behov av tid för övervakning.

För att visa på spridningen i återbetalningstid för ett antal anläggningar med olika storlek har data över årlig elförbrukning i en linje i biosteget inhämtats från ett antal svenska reningsverk, vilket visas i Figur 5.6. Data från Käppalaverket och Henriksdals reningsverk är hämtade från arbetet med denna rapport. Data från Kungsängens reningsverk kommer från Jesper Olsson på Uppsala Vatten, data från Kungsängens reningsverk i Västerås kommer från Andreas Nilsson på Mälarenergi och uppgifterna från Sternö reningsverk (linje 2) från Larsson (2011). I Figur 5.6 har samma antaganden gjorts som i Figur 5.5, d.v.s. kostnaderna härstammar från inköp och installation av en ammoniumgivare samt programmering i styrsystemet, och tiden för underhåll antas kompenseras med minskad tid för övervakning.



Figur 5.6. Några exempel på återbetalningstid om ammoniumåterkoppling i en linje skulle implementeras på ett antal svenska reningsverk. Energibesparingen som en följd av ammoniumåterkoppling antogs vara 10 %. Energiförbrukningen och därmed energibesparingen i en linje är högre i större anläggningar vilket gör att återbetalningstiden blir kortare.

Sammanfattningsvis kan sägas att det är viktigt att komma ihåg att en ändrad reglering medför både kostnader och nytta, och att det är viktigt att väga in dessa i en kostnads-nyttoanalys. Investeringsbehovet, underhåll av givare och storleken på anläggningen kommer påverka utfallet av en sådan analys. Notera att det kan finnas skäl att implementera ammoniumåterkoppling även vid lite längre återbetalningstider, t.ex. då det är avgörande för att uppnå god kväverening. En nytta som inte är med i ovanstående analys är förmågan att uppnå utsläppskravet.

6 Exempel från fullskaleförsök

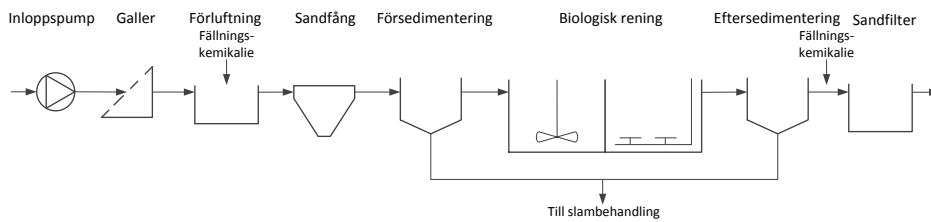
Denna del av rapporten ger en översikt över implementering och utvärdering av ammoniumåterkoppling på Henriksdals reningsverk, Käppalaverket och Himmerfjärdsverket som skedde under åren 2010 till 2014.

6.1 Henriksdals reningsverk, Käppalaverket och Himmerfjärdsverket

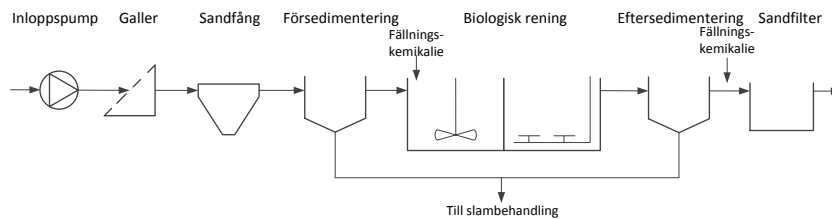
De tre reningsverken som utvärderat ammoniumåterkoppling ligger alla i eller runt Stockholm. Henriksdals reningsverk är den största anläggningen och den mest centralt belägna. Henriksdals reningsverk renar vatten från ca 780 000 personer, och tar emot ca 280 000 m³ vatten per dag. Käppalaverket ute på Lidingö har ca 450 000 anslutna personer med ett dagligt inflöde om ca 160 000 m³. Himmerfjärdsverket söder om Stockholm tar emot vatten från ca 290 000 personer. Inflödet är ca 115 000 m³/d.

Henriksdals och Käppalaverkets reningsprocesser liknar varandra med mekanisk rening, biologisk rening med efterdenitrifikation samt eftersedimentering och sandfilter. En skillnad är att man på Käppalaverket använder simultanfällning, medan man på Henriksdals reningsverk använder förfällning. Himmerfjärdsverket har endast nitrifikation i sin aktivslamprocess. Denitrifikationen sker i en fluidiserad bädd och partiklar från utgående vatten tas därför bort både med skivdiskfilter och sandfilter.

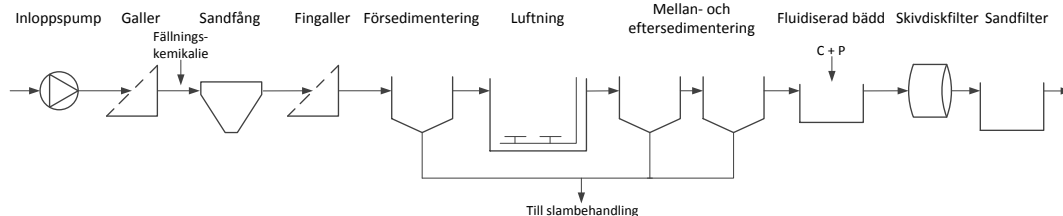
Henriksdals reningsverk



Käppalaverket



Himmerfjärdsverket



Figur 6.1. Översikt över de tre reningsverkens processer. Slambehandlingen är inte inkluderad. C = kol, P = fosfor.

Käppalaverket och Henriksdals reningsverk har ett utsläppsvillkor där man ska nå 10 mg/l totalkväve på årsbasis. Sommartid behöver anläggningarna ligga under 3 mg $\text{NH}_4\text{-N/l}$. Sedan 2013 har Himmerfjärdsverket ett utsläppsvillkor på 8 mg/l totalkväve. Alla tre anläggningar ligger normalt mellan 8 till 9 mg/l i utgående totalkväve och 1 till 2 mg $\text{NH}_4\text{-N/l}$ på årsbasis.

6.2 Försöksupställning

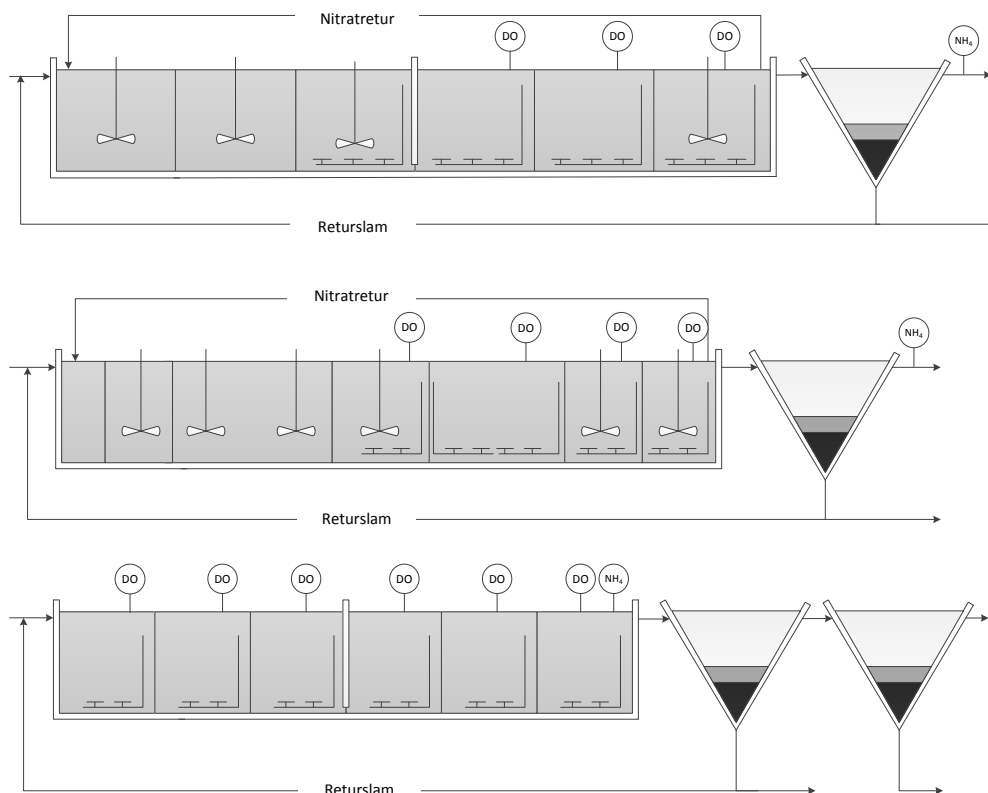
Sex av sju parallella linjer på Henriksdals reningsverk användes i de jämförande försöken. Tre av de sex linjerna hade ammoniumåterkoppling medan de andra tre styrdes med konstanta syrehalter som operatörerna ändrade över tid. Vid försöksstart hade Henriksdal on-line ammoniumgivare efter sedimenteringen i samtliga sina linjer. Dessa användes för ammoniumåterkoppling. Ammoniumregulatorn styrde syrebörvärdet i de två första luftade zonerna. Den sista zonen hade ett konstant syrebörvärde för att undvika att höga syrehalter recirkuleras tillbaka till denitrifikationen.

På Henriksdals reningsverk och Käppalaverket användes ammoniumgivare av modellen WTW Varion. och på Himmerfjärdsverket användes Hach-Langes NH₄D se.

Vid projektets start 2010 hade Käppalaverket möjlighet att styra flera av sina elva linjer med syrereglering och ammoniumåterkoppling. Två försökslinjer användes för utvärdering av ammoniumåterkoppling. Dessa linjer kördes växelvis med ammoniumåterkoppling, växelvis med konstanta syrehalter. Liksom Henriksdal hade Käppalaverket redan installerade ammoniumgivare efter sedimenteringen. Även här beräknade ammoniumregulatorn ett externt börvärde till alla luftade zoner utom den sista zonen som höll ett konstant syrebörvärde.

Himmerfjärdsverket saknade individuell styrning av luftflöde till varje luftad zon i sina bassänger. Istället fanns det en luftflödesventil in till varje linje som styrde det totala luftflödet i linjen baserat på syrehalten i den första luftade zonen. Detta gav upphov till höga syrehalter i slutet på luftningsprocessen när ammonium var fullständigt nitrifierad. För försökens räkning byggdes en av åtta parallella linjer om till att inkludera individuell styrning av luftflöde och syrehalt i varje zon, med en ammoniumregulator som beräknade syrebörvärdet till samtliga sex luftade zoner. Ammoniumgivaren placerades i den sista luftade zonen. De övriga sju linjerna användes som referenslinjer.

Figur 6.2 visar en översikt över aktivslamprocessen på de tre reningsverken, med syre- och ammoniumgivare utmärkta.



Figur 6.2. Aktivslamprocess och instrumentering i försökslinjerna på Henriksdals reningsverk (överst), Käppalaverket (mitten) och Himmerfjärdsverket (nederst). DO = syrehalt (dissolved oxygen).

6.2.1 Val av regulatorparametrar

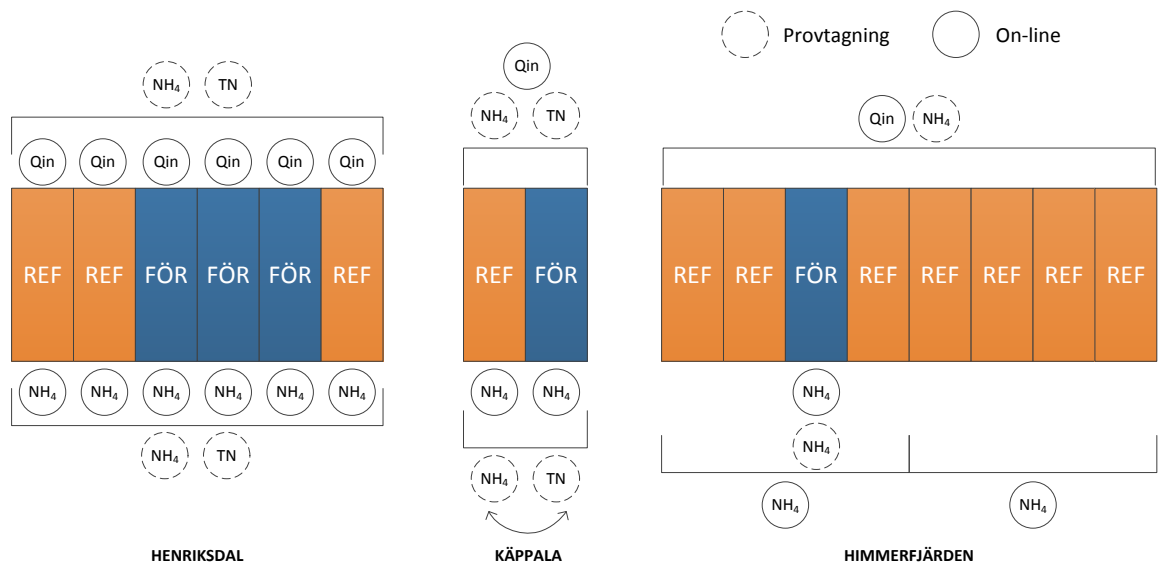
Ammoniumåterkopplingen trimmades efter de tre olika processernas behov och i nära dialog med processansvariga på reningsverken. På Henriksdals reningsverk gjordes ammoniumregulatorn långsam genom att ha en väldigt låg regulatorförstärkning och lång integrationstid. Detta för att undvika att syrehalten skulle vara som lägst i aktivslamprocessen när belastningen var som högst, vilket skulle vara ett resultat av snabb reglering och lång tidsfördröjning på ammoniumsignalen. Ammoniumbörvärdet sattes till 1 mg/l eftersom man eftersträvar en långt gången nitrifikation. Den högsta och lägsta tillåtna syrehalten varierades under året. Den högsta syrehalten valdes relativt hög (2,5 till 4 mg/l) eftersom man på verket visste sedan tidigare att även höga syrehalter hade effekt på nitrifikationen. Det fanns också en misstanke om att syregivarnas placering relativt nära ytan överskattade den genomsnittliga syrehalten i de luftade zonerna.

På Käppalaverket var ammoniumgivarna också placerade efter sedimenteringen vilket gav en lång tidsfördröjning på signalen. Eftersom utgående ammoniumhalt på Käppalaverket sällan hade ett repetitivt dygnsmonster valdes trots tidsfördröjningen en relativt snabb reglering. När en ammoniumtopp trots allt kom – oftast på grund av t.ex. regn – kan regulatorn snabbt höja syrehalten. Ammoniumbörvärdet valdes lågt (0,8 mg/l) eftersom man eftersträvade fullständig nitrifikation. Käppalaverket kan uppnå fullständig nitrifikation vid relativt låga syrehalter, speciellt under sommartid. Det lägsta tillåtna syrebörvärdet blev därför det verktyg som framförallt användes för att anpassa regulatorn efter årstidsvariationer och för att undvika för processen skadligt låga syrehalter.

På Himmerfjärdsverket lämpar sig snabb ammoniumstyrning eftersom man har stora variationer i reningsgrad över dygnet. Eftersom ammoniumgivaren placerades direkt i luftningsbassängen minskades tidsfördröjningen i signalen jämfört med situationen på Henriksdal och Käppalaverket. Ammoniumbörvärdet sattes till 2,0 mg/l. Ett lägre ammoniumbörvärde hade inneburit att syrehalten hade varit på sitt högsta tillåtna värde större delen av dygnet. Den högsta och lägsta tillåtna syrehalten sänktes sommartid.

6.3 Sammanfattning av försöksmetoden

En sammanställning av försöksuppställningen på de tre reningsverken visas i Figur 6.3. Här visas hur många parallella linjer som jämförts och hur många linjer som fungerat som försöks- respektive referenslinjer. I figuren framgår det också vilken instrumentering som använts för att mäta flöde och kvävefraktioner.



Figur 6.3. Sammanfattning av försöksuppställningen inklusive instrumentering för de tre reningsverken. REF = referenslinje och FÖR = försökslinje. Qin = flöde, TN = totalkväve, NH₄= ammoniumkväve.

Tabell 6.1. Sammanfattning av inställningarna i försöken.

	Utvärderings- period	Börvärde NH ₄ (mg/l)	K	T _i (s)	Jämförelse mot	Temperatur (°C)
Henriksdal	12 månader	1,0	-0,07	10 000	Konstanta syrehalter i alla zoner	16,7 (9,2 – 23,8)
Käppala	8 månader	0,8	-0,2	1 000	Konstanta syrehalter i alla zoner	11,5 (7,6 – 15,6)
Himmerfjärden	12 månader	2,0	-1,2	1 200	Konstanta syrehalter i zon 1 av 6 (1 luftflödesventil till 1 linje)	14,2 (9,4 – 18,2)

Tabell 6.2. Begränsningar i syrebörvärde i ammoniumregulatorerna under försöken.

	Lägsta begränsning i syrebörvärde		Högsta begränsning i syrebörvärde	
	Min (mg/l)	Max (mg/l)	Min (mg/l)	Max (mg/l)
Henriksdal	1,5	2	2,5	4
Käppala	1	1,3	2	2,2
Himmerfjärden	1	1,5	2,5	3

6.4 Utvärderingsmetoder

6.4.1 Uppskattning av energiförbrukning

Ett försök gjordes att kvantifiera energiförbrukningen från uppmätta luftflöden på reningsverken med syfte att uppskatta energibesparingen från implementering av ammoniumåterkoppling. Mer om detta i avsnitt 6.6.

6.4.2 Kostnads-nyttoanalys

Utöver energiberäkningen sammanställdes en kostnads-nyttoanalys för varje reningsverk. Kostnader för ombyggnation, installation av utrustning, programmering av styrsystem samt årligt underhåll av ny utrustning jämfördes mot den ekonomiska nyttan av ammoniumåterkoppling. Avskrivningstiden för utrustning var 15 år och ombyggnationer 30 år. Låneräntan antogs vara 4 %.

Nyttan för Henriksdals reningsverk och Käppalaverket var minskad energiförbrukning. För Himmerfjärdsverket bestod nyttan i minskad energiförbrukning och ökad försäljning av biogas, eftersom ca 40 % av luftflödet produceras av en gasmotor. Ovanstående uppskattning av energiförbrukning användes för att kvantifiera den årliga energibesparingen från ammoniumåterkoppling.

Baserat på den årliga kostnaden och nyttan kunde en återbetalningstid för implementering av ammoniumåterkoppling beräknas.

6.4.3 Hypotesprövning

Statistisk hypotesprövning användes för att undersöka om det fanns någon signifikant skillnad mellan försöks- och referenslinjer med avseende på utgående ammoniumhalt och syrehalt. Ett tvåsidigt parat t-test användes med signifikansnivå 0,05 (Snedecor & Cochran, 1989). Testet utfördes på dygnsmedelvärden på syrehalt och dygnsmedelvärden (Henriksdal, Käppala) och veckomedelvärden (Himmerfjärden) på ammoniumhalt.

Hypoteser:

H_0 : Skillnaden i medelvärde mellan försökslinjer och referenslinjer är noll.

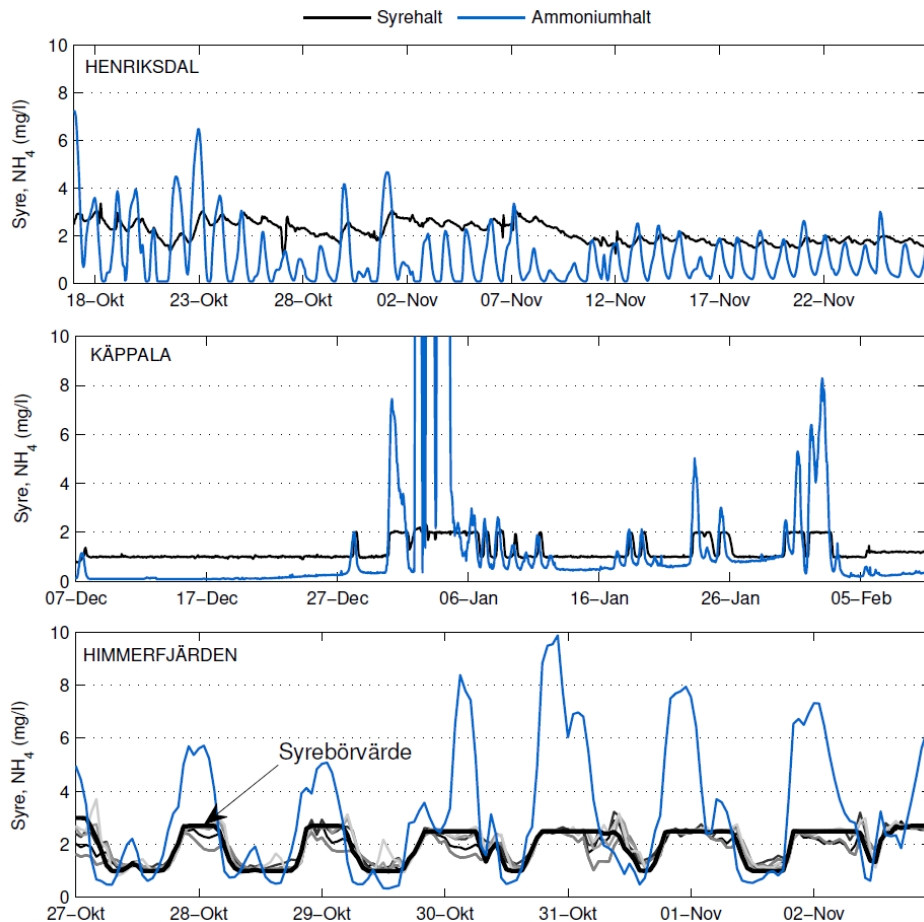
H_1 : Skillnaden i medelvärde mellan försökslinjer och referenslinjer är signifikant skilt från noll.

6.5 Ammoniumregulatorernas beteende

I Figur 6.4 visas exempel på hur ammoniumregulatorerna på Henriksdal, Käppala och Himmerfjärdsverket fungerat. Trots att det är samma reglerstruktur på alla tre verken har ammoniumregulatorn olika funktion på de tre anläggningarna. På Henriksdals reningsverk är regleringen långsam och syrehalten glider fram. Detta för att hantera tidsfördröjningen som uppkommer eftersom ammoniumgivaren är placerad efter sedimenteringen, se vidare 6.7.2.

På Käppalaverket däremot har ammoniumregulatorn gjorts snabb trots tidsfördröjningen över sedimenteringen. Orsaken är att det är så sällan som ammoniumtoppar uppträder i processen. Vintertid kan ammoniumtoppar uppkomma vid låga syrehalter, men om den lägsta tillåtna syrehalten höjs kan dessa oftast undvikas.

På Himmerfjärdsverket är ammoniumgivaren placerad direkt i luftningsbassängen och de stora dygnsvariationerna i reningsresultat ger dagliga variationer i syrehalt när ammoniumregulatorn görs snabb.



Figur 6.4. Exempel på hur ammoniumregulatorn styr syrehalten på Henriksdal, Käppala och Himmerfjärdsverket. Syrehalten i den första luftade zonen visas för Henriksdal och Käppala. Syrehalten i alla luftade zoner visas för Himmerfjärdsverket, inklusive syrebövrådet.

I ett statistiskt test är p-värdet sannolikheten att uppnå ett observerat resultat om noll-hypotesen är sann. Om p-värdet är lägre än 0,05 förkastas noll-hypotesen. Att ha 5 % som signifikansnivå i statistiska tester är ett vanligt val. Signifikansnivån kan tolkas som den risk man tar att tolka testet fel, d.v.s. risken att man förkastar en sann nollhypotes.

I detta fall innebär nollhypotesen att det inte är någon skillnad mellan ammoniumåterkoppling och styrning med konstanta syrehalter med avseende på syrehalt i bassängerna. Eftersom $p < 0,05$ har ammoniumåterkoppling bidragit till en statistisk signifikant ändring i syrehalt (Tabell 6.3). Syrehalten var mellan 12 och 55 % lägre med ammoniumåterkoppling. När utgående ammoniumhalter jämförs är det ingen statistiskt signifikant skillnad mellan de olika styrstrategierna, eftersom $p > 0,05$. I jämförelsen mellan referens- och försökslinjer togs data från icke-representativa perioder bort. Det handlar om perioder med snösmältning, perioder då givarna inte fungerat eller perioder då flödet av någon orsak var

lägre till någon linje. På Henriksdal och Himmerfjärdsverket beräknades medelvärden av de återstående linjerna även då någon av de andra linjerna i försöken uppvisade avvikande beteende.

Syrebörvärdet var detsamma till alla luftade zoner som får ett externt beräknat börvärde från ammoniumregulatorn. Skillnaden i syrehalt mellan den andra luftade zonen och den sista luftade zonen på Himmerfjärdsverket har uppkommit p.g.a. begränsningar i luftningsintensitet.

Under försöken sågs inga negativa effekter på slamkvaliteten som ett resultat av ammoniumåterkopplingen, men frågan blev aldrig helt utredd på Käppalaverket där man har möjlighet att gå väldigt lågt i syrehalt.

Tabell 6.3. Sammanfattning av försöksresultaten på Henriksdal, Käppala och Himmerfjärdsverket. Standardavvikelse baserat på månadsmedelvärden. Två mätpunkter för ammonium på Himmerfjärdsverket: Block A (^A) och block B (^B). ²Andra luftade zonen, ⁶sjätte luftade zonen, ^Llabanalys.

	Syrehalt (medelvärde)				Ammoniumhalt (medelvärde)		
	Ref. (mg/l)	För. (mg/l)	Diff. (%)	p-värde t-test	Ref. (mg/l)	För. (mg/l)	p-värde t-test
Henriksdal	2,9 ± 0,7	2,5 ± 0,7	-12 ± 7,7	p < 0,001	1,4 ± 0,8	1,3 ± 0,7	p = 0,51
Käppala	2,0 ± 0,2	1,4 ± 0,3	-31 ± 9,5	p < 0,001	0,8 ± 0,3	0,7 ± 0,4	p = 0,06
Himmerfjärden	2,2 ² ± 0,4	1,7 ² ± 0,2	-22 ² ± 10	p < 0,001 ²	2,0 ± 1,7 ^A	2,2 ^L ± 1,3	p = 0,39 ^A
	4,9 ⁶ ± 0,5	2,2 ⁶ ± 1,3	-55 ⁶ ± 8,3	p < 0,001 ⁶	1,8 ± 1,9 ^B		p = 0,73 ^B

6.6 Uppskattad energiförbrukning och kostnads-nyttoanalys

På alla tre reningsverken fanns systematiska skillnader i luftflöde mellan de parallella linjerna. Detta gjorde det svårt att göra en direkt jämförelse av luftflödet i försöks- och referenslinjer. Skillnaden i luftflöde mellan linjerna var i storleksordningen 10 %, vilket är ungefär vad man kan vänta sig att energibesparingen från ammoniumåterkoppling är.

På Henriksdals reningsverk kunde en minskad syrehalt på runt 40 % resultera i en knappt mätbar minskning i luftflöde, och tvärt om. Eftersom detta inte är trovärdigt gjordes en analys av de parallella linjerna baserat på perioder med samma syrehalter. En referenslinje och en försökslinje valdes ut där luftflödet normerades efter skillnader i luftförbrukning under perioder med samma syrehalter. Skillnaden i dessa två linjer blev 7 % under de 12 månader försöken pågick. Den genomsnittliga minskningen i syrehalt i försökslinjen var 9 %, vilket är något lägre än den genomsnittliga minskningen under försöksperioden då alla sex linjer jämfördes (12 %, se Tabell 6.3). En minskad luftförbrukning om 7 % ger en återbetalningstid på ca 3 månader. Orsaken till att återbetalningstiden är så kort är att kostnaderna (programmering i styrsystemet) är betydligt lägre än nyttan (minskad energiförbrukning) samt att Henriksdal är ett stort reningsverk (se resonemanget i avsnitt 5.4).

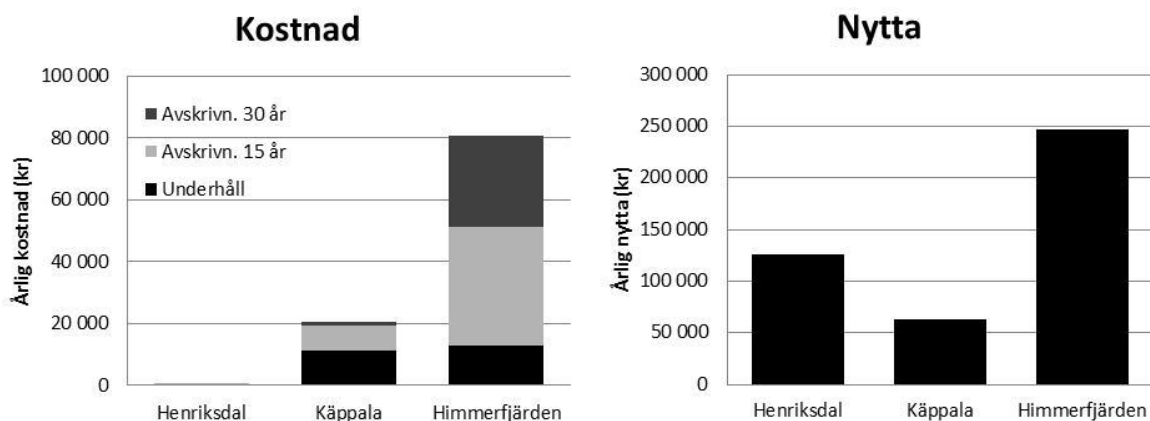
Under försöken på Käppalaverket uppdagades att luftflödesmätningarna i en av de två försökslinjerna inte mätte korrekt. Luftflödesmätarna underskattade luftflödet och luftflödesdata kunde därför inte användas för att utvärdera energiförbrukningen. Istället användes en fyra veckor lång period under vintern 2013 då den linje där luftflödesgivarna fungerade växelvis drevs med ammoniumåterkoppling och konstanta syrehalter en vecka åt gången. En ytterligare försöksvecka valdes bort eftersom belastningen var betydligt lägre under denna vecka, vilket gav missvisande resultat enligt resonemanget i avsnitt 5.3. Under perioden togs veckosamlingsprover ut från försökslinjen och analyserades med avseende på totalkväve, organiskt kväve, ammoniumkväve och nitratkväve. Perioden var kall och inflöde, vattentemperatur och inkommande

belastning jämn. Under den här perioden bidrog ammoniumåterkoppling med en minskad syrehalt på 40 %, vilket gav upphov till 13 % lägre luftåtgång. En minskad syrehalt på 40 % är högre än under resten av de 8 månader då försöken pågick. Därför antas 13 % vara ett icke-representativt värde. Om energibesparingen istället antogs vara 10 % blev återbetalningstiden drygt 2 år.

På Himmerfjärdsverket var det känt sedan tidigare att flödesfördelningen inte är jämn mellan linjerna. Därför användes samtliga 7 linjer utöver försökslinjen som referenslinjer. Minskningen i luftflöde i försökslinjen jämfört med referenslinjen var 15 %. Linje 3 har en något högre belastning än genomsnittslinjen på verket och hade innan installation av zonreglering och ammoniumåterkoppling ca 5 % högre luftförbrukningen än genomsnittet på verket. Om man kompenserar för denna skillnad blir luftflödesförbrukningen 19 % lägre i försökslinjen jämfört med övriga sju linjer. Notera att jämförelse görs mellan zonreglering av syre och ammoniumåterkoppling och fallet då hela luftflödet till en linje styrs via en ventil (se Tabell 6.1). Återbetalningstiden för ammoniumåterkoppling och zonreglering av syre på Himmerfjärdsverket blev 4 år.

En sammanfattning av kostnader och nyttor på de tre reningsverken visas i Figur 6.5. Kostnader för avskrivningar är som högst på Himmerfjärdsverket, där kostnader för ombyggnation samt köp av luftflödesventiler är de enskilt största posterna. Trots den stora uppskattade energibesparingen på ca 19 % är därför återbetalningstiden som längst här jämfört med de andra reningsverken. Återbetalningstiden kan minskas med ett år om reningsverket inte installerar luftflödesstyrning i samtliga zoner, d.v.s. om syreregulatorn styr ventilens läge. I teorin ger detta en mer svärtrimmad reglering. Försök med detta på Himmerfjärdsverket visade att det inte försämrade styrningen.

Även om energibesparingen i procent är som lägst på Henriksdals reningsverk så är besparingen i pengar högre än på Käppalaverket. Detta beror på att Henriksdals reningsverk har en större energiförbrukning än Käppalaverket eftersom verket är större. Kostnaderna på Käppalaverket var högre än på Henriksdal eftersom man behöver installera ammoniumgivare och syregivare i de linjer där man idag inte har ammoniumåterkoppling.



Figur 6.5. Årlig kostnad och nytta på de tre reningsverken med implementering av ammoniumåterkoppling i en linje. Storleken på reningsverken, uppskattad energibesparing med ammoniumåterkoppling samt behov av ombyggnation är de tre faktorer som påverkar resultatet mest.

6.7 Implementering av ammoniumåterkoppling

När ammoniumåterkoppling implementerades och utvärderades på de tre reningsverken var de huvudsakliga orsakerna till förseningar i projektet slamproblem, styrsystem och regulatorer samt problem med givare. Styrsystem och givare diskuteras i de nästföljande avsnitten. Slamproblemen var egentligen inte relaterade till själva ammoniumåterkopplingen, men skapade förseningar när styrförmågan begränsades då man på verken ville undvika låga syrehalter under perioder då det fanns risk för flytslam, eller när slamskraporna gick sönder i försökslinjerna.

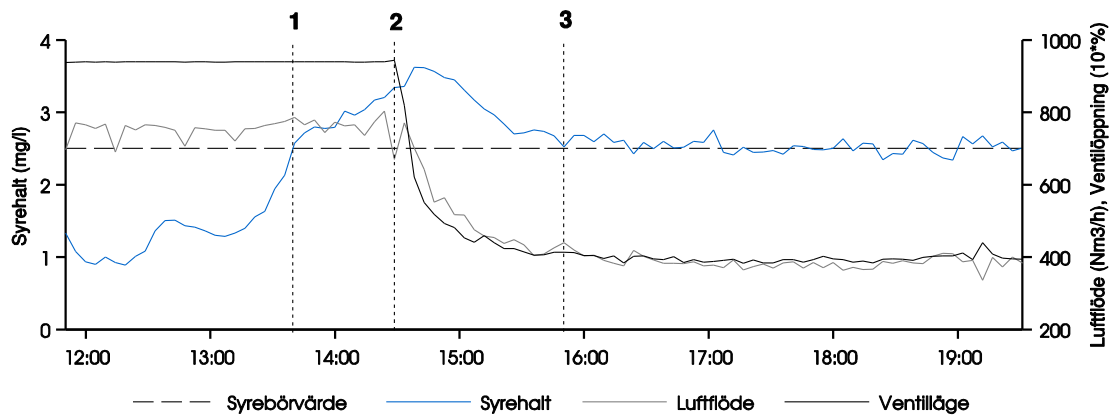
6.7.1 Styrsystemet

På samtliga reningsverk användes PI-regulatorer för både syre- och ammoniumreglering. Kommersiella PI-regulatorer har funnits på marknaden i många årtionden och är den absolut vanligaste regulatorn inom processindustrin. Trots detta tog implementeringen i styrsystemen bitvis lång tid. Förseningarna uppkom ofta av att personer med behörighet att göra ändringar i styrsystemet var upptagna.

På både Himmerfjärdsverket och Henriksdals reningsverk gick det inte att välja en tillräckligt lång integrationstid. På Himmerfjärdsverket fanns det en inprogrammerad spärr och på Henriksdals reningsverk kunde man inte mata in tillräckligt många siffror i rutan för integrationstiden. Eftersom ammonium har en lång responstid på en ändring i syrehalt behöver integrationstiden kunna väljas lång.

På Himmerfjärdsverket användes SCADA-systemet (Supervisory Control and Data Acquisition) Citect. Det finns inga regulatorer i Citect, utan dessa finns istället i fristående kod från Beijer Electronics som kommunicerar med Citect. Det skickas ingen information mellan de fristående regulatorerna även om de befinner sig i kaskad med varandra om detta inte programmeras in vid implementering, vilket det gör i industriella styrsystem. Detta gör att regulatoruppvridning kan uppkomma i kaskadkretsen (se avsnitt 4.1). Om en luftflödesregulator går i gräns och inte syrerregulatorn får reda på det fortsätter syrerregulatorn att höja eller sänka luftflödesbörvärdet, trots att hela reglerkretsen förlorat styrförmågan. Ett exempel visas i Figur 6.6. Följande punkter är markerade i figuren:

1. Efter en tid då ventilen mättat och luften inte räckt till når tillslut syrehalten sitt börvärde. Egentligen borde syrerregulatorn be om ett sänkt börvärde till luftflödesregulatorn, men på grund av integratoruppvridning fortsätter syrehalten att stiga.
2. Tillslut minskas luftflödesbörvärdet, ventilläget sänks och syrehalten börjar efter ett tag sjunka.
3. Syrehalten är tillbaka på sitt börvärde.

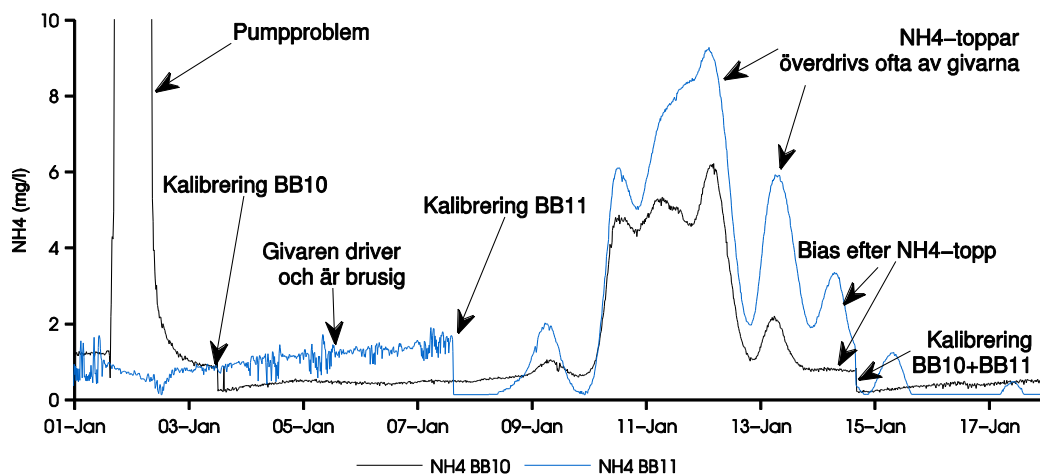


Figur 6.6. Exempel på integratoruppvridning i en masterregulator i en kaskadkrets på Himmerfjärdsverket i november 2013. Femminutersdata från zon 4.

Luftflödesgivarna togs bort i de tre första luftade zonerna i försökslinjen på Himmerfjärdsverkets eftersom dessa misstänktes strypa luftflödet. Ventilläget styrdes då med en PI-regulator baserat på den uppmätta syrehalten. På detta sätt kunde integratoruppvridning i syreregulatorn undvikas eftersom kaskadregleringen var borttagen.

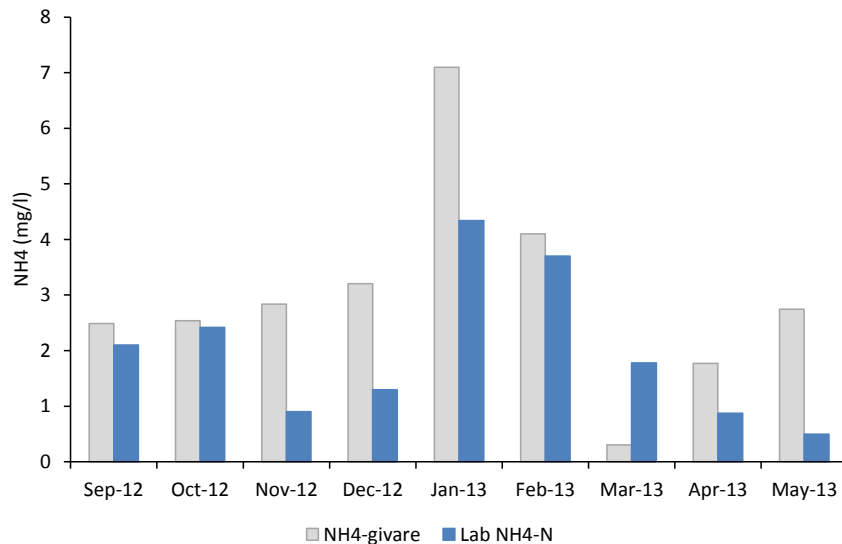
6.7.2 Ammoniumgivare

Ammoniumgivarna har fungerat olika bra på de tre reningsverken. Det vanligaste problemet med givarna var att signalen drev iväg och visade felaktiga värden. Exempel på olika typer av givarfel i de två ammoniumgivarna i försöken på Käppalaverket visas i Figur 6.7. Givarna uppvisade exempel på drift, brus och systematiska fel. Dessutom överdrivs ofta ammoniumtopparna av givarna, framförallt av givaren i BB11. Det innebär att givaren behövde kalibreras om i stort sett efter varje större ammoniumtopp.



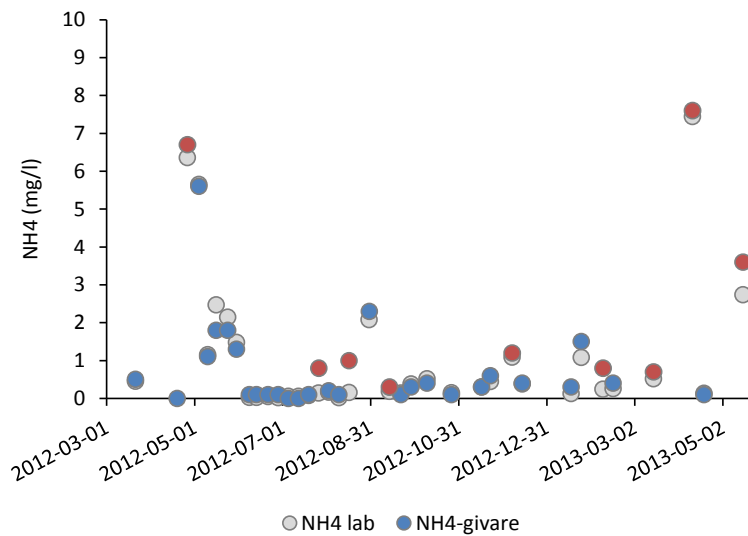
Figur 6.7. Exempel på givarfel på Käppalaverket i januari 2014. De två ammoniumgivarna sitter efter mellansedimenteringen i BB10 och BB11 på Käppalaverket.

Trots underhåll varje vecka och vid behov hade ammoniumgivaren på Himmerfjärdsverket svårt att mäta korrekt. Den genomsnittliga ammoniumhalten som ammoniumgivaren visade var oftast högre än lab-proverna (Figur 6.8). Detta innebar att syrehalten var högre än den hade behövt vara för att uppnå börvärdet, men det innebar också att kvävereningen inte äventyrades.



Figur 6.8. Månadsmedelvärden av ammonium uppmätt med on-linegivare i den sista luftade zonen och på veckosamlingsprover ut från linje 3 på Himmerfjärdsverket.

Ammoniumgivare var redan innan projektet installerade efter mellansedimenteringen på Henriksdal. Dessa givare fungerade bra under försöken med få avbrott och god överensstämmelse med labprover. Ett exempel från den veckovisa givarkontrollen där ammoniumgivare och labanalys jämförs för ett stickprov visas i Figur 6.9.



Figur 6.9. Stickprover för kontroll av en av ammoniumgivarna under 2012 och 2013 på Henriksdal. Grå: labanalys, röd: ammoniumgivare (kalibrering gjordes), blå: ammoniumgivare (ingen kalibrering).

Andra källor uppger att det är möjligt att få jonselektiva givare att fungera väl i en luftningsprocess. (Rieger and Siegrist, 2002; Kaelin *et al.*, 2008).

Ammoniumgivarna på Henriksdals reningsverk och Käppalaverket är placerade efter mellansedimenteringen. Genom att placera givarna efter mellansedimenteringen skapas en tidsfördröjning på grund av uppehållstiden i sedimenteringen. Vanligtvis vill man att givaren ska vara placerad i luftningsprocessen så att mätningen blir mer i fas med de faktiska koncentrationerna i processen. Käppalaverket tog beslutet för ett antal år sedan att flytta ammoniumgivaren från luftningsbassängen till efter mellansedimenteringen för att öka kvaliteten på givarsignalen och minska behovet av underhåll. Henriksdals reningsverk var inte intresserade av att flytta de befintliga ammoniumgivarna till luftningsbassängen av samma skäl.

Upphållstiden i mellansedimenteringen på Henriksdal medför att om en fördröjd ammoniummätning bidrar till att syrehalten sänks vid snabb ammoniumreglering till låga, så kommer syrehalten vara som lägst då belastningen nästan är som högst. Det är av denna orsak som ammoniumregulatorn gjorts långsam på Henriksdal. Försök med att använda snabb reglering antydde att den dygnsvisa ammoniumtoppen förstärktes (Åmand, 2014). Upphållstiden i Käppalaverkets mellansedimentering är något kortare än på Henriksdal, och framförallt har man inte en lika kraftig dygnsvariation i belastning här. Detta tillsammans med den väldigt jämna utgående ammoniumhalten gjorde att en snabb ammoniumreglering valdes trots tidsfördröjningen över mellansedimenteringen.

7 Referenser

- Carlsson, B. & Hallin, S. (2010) *Tillämpad reglerteknik och mikrobiologi i kommunala reningsverk*. Svenskt Vatten Publikation U5.
- Kaelin, D., Rieger, L., Eugster, J., Rottermann, K., Bänninger, C. & Siegrist, H. (2008) Potential of in-situ sensors with ion-selective electrodes for aeration control at wastewater treatment plants. *Water Science and Technology* **58**(3), 629–37.
- Kampschreur, M. J., Temmink, H., Kleerebezem, R., Jetten, M. S. M. & Loosdrecht, M. C. M. van. (2009) Nitrous oxide emission during wastewater treatment. *Water research* **43**(17), 4093–103.
- Larsson, V. (2011) Energy savings with a new aeration and control system in a mid-size Swedish wastewater treatment plant. Examensarbete, Institutionen för Informationsteknologi, Uppsala universitet.
- Martins, M. P., Pagilla, K., Heijnen, J. J. & Loosdrecht, M C M van. (2004) Filamentous bulking sludge — a critical review. *Water research* **38**, 793–817.
- Rieger, L. & Siegrist, H. (2002) In-situ measurement of ammonium and nitrate in the activated sludge process. *Water Science and Technology* **45**(4-5), 93–100.
- Rieger, L., Takács, I., Villez, K., Siegrist, H., Lessard, P., Vanrolleghem, P. A. & Comeau, Y. (2010) Data reconciliation for wastewater treatment plant simulation studies-planning for high-quality data and typical sources of errors. *Water environment research* **82**(5), 426–33.
- Snedecor, G. W. & Cochran, W. G. (1989) *Statistical methods*. 8:e upplagan, Iowa State University Press, Ames, Iowa, U.S.
- Åmand, L. (2013) Styrning av luftningsprocesser i avloppsreningsverk. SVU rapport 2013-18.
- Åmand, L. (2014) Ammonium feedback control in wastewater treatment plants. Doktorsavhandling, Institutionen för Informationsteknologi, Uppsala universitet.
- Åmand, L., Olsson, G. & Carlsson, B. (2013) Aeration control – a review. *Water Science and Technology* **67**(11), 2374–2398.
- Åström, K. J. & Hägglund, T. (1995) *PID controllers: theory, design and tuning*, 2:a upplagan, Instrument Society of America, Research Triangle Park, NC, U.S.



IVL Svenska Miljöinstitutet AB, Box 210 60, 100 31 Stockholm
Tel: 08-598 563 00 Fax: 08-598 563 90
www.ivl.se