



Nr B 2399
November 2020

Virtuell driftsättning av styrsystem på reningsverk



Erik U. Lindblom och Oscar Samuelsson

Författare: Erik U. Lindblom och Oscar Samuelsson, IVL Svenska Miljöinstitutet

Medel från: Stiftelsen IVL, Stockholm Vatten och Avfall

Fotograf: Siemens

Rapportnummer B 2399

ISBN 978-91-7883-230-9

Upplaga Finns endast som PDF-fil för egen utskrift

© **IVL Svenska Miljöinstitutet 2020**

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

Tel 010-788 65 00 // www.ivl.se

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

Innehållsförteckning

Summary	i
Sammanfattning.....	1
1 Introduktion	2
1.1 Projektets vision	2
1.2 Syfte och mål	4
2 Genomförande.....	5
2.1 Stockholms Framtida Avloppsrening.....	5
2.2 Processmodell	5
2.2.1 Konfiguration	6
2.2.2 Inkommande vatten.....	7
2.2.3 Kalibrering och anpassning av processmodell	7
2.3 Systemintegration (skapande av den digitala tvillingen)	7
2.3.1 Virtuellt styrsystem.....	7
2.3.2 Datakommunikation	8
2.3.3 Synkronisering, försök 1.....	8
2.3.4 Simuleringshastighet.....	9
2.3.5 Synkronisering, försök 2.....	9
2.3.6 Licenser.....	9
2.3.7 Tillgänglighet.....	10
3 Fallstudie: styrning av luftning	11
3.1 Reglerkretsen för luftflöde	11
3.2 Signalutbyte inom den digitala tvillingen	12
3.3 Utveckling av processmodell för luftflödesdynamik	12
4 Resultat	13
4.1 Översikt	13
4.2 Regulatorintrimning med den digitala tvillingen.....	14
4.2.1 Lambdametoden.....	14
4.2.2 Skalning av signaler	14
4.2.3 Intrimning av luft- och syrerregulatorn.....	15
4.2.4 Val av parametervärden för ammoniumregulatorn	16
4.3 Test av styrsystemets funktionalitet med den digitala tvillingen.....	17
4.3.1 Processtörning luftflöde	17
4.3.2 Anti-windup internt i regulatorn.....	19
4.3.3 Anti-windup inom kaskadregleringen, ändring från externt till internt börvärde.....	19
4.3.4 Anti-windup inom kaskadregleringen, inställning av min- och maxgränser	20
4.3.5 Processtörning i inkommande vatten	22
4.4 Diskussion.....	23
4.5 Framtida arbete.....	24
5 Slutsatser	25

6	Referenser.....	26
---	-----------------	----

Summary

Stricter requirements on wastewater treatment plants (WWTPs) call for more advanced and robust process control. In this project, entitled “A virtual WWTP control system acceptance test”, the possibility of using a digital twin as a tool for troubleshooting and optimising the commissioning of control systems is therefore studied.

The Henriksdal WWTP in Stockholm, Sweden, is being reconstructed and new control systems for the treatment process are developed. A time critical aspect is to check if new control system code is correctly implemented, which today is done in so called factory acceptance and site acceptance tests (FAT and SAT). These are rather time-consuming procedures since they to a large degree relies on manual checks, e.g. by analysing the impact of a change of a signal value on each of the thousands of signals and hundreds of controllers of the control system. Moreover, despite these rigorous tests, errors are often discovered only when the process and control system have been taken into operation.

In this project it was studied how a digital twin could complement the traditional tests and thereby contribute to a more streamlined commissioning of new treatment processes and control systems. A digital twin based on a dynamic model (MATLAB®/Simulink®) of the WWTP process that communicates with the process control system (SIMATIC PCS 7, Siemens) via the simulation software SIMIT was developed. The application was implemented within the IT network of the WWTP owner (Stockholm Water and Waste company, SVOA), which facilitates the use of real control system code.

In the project an attempt to describe how a virtual acceptance test (VAT) of the controller type PI can be conducted was made. Several realistic disturbances, which could not be studied with the methodology used today, were evaluated. The main benefit of the application was that the entire control system, including process dependencies, could be tested. Simple errors like unrealistic parameter values can be discovered. Weaknesses that are more difficult to detect can be discovered as well by running the digital twin. An example is lack of anti-windup functionality among cascade PI-controllers.

A digital copy of a realistic control system was used in the application, in which the interface (HMI) is identical with reality. The application is thus suitable for proactive training of operational staff and education also before the process has been taken into operation. This feature also enables that the end-user, to a higher degree, to be part of the troubleshooting, verification and optimisation of the control system during the commissioning. Once in operation, the digital twin can be re-used for virtual process optimisation.

The following aspects should be considered to further evaluate the benefits of the digital twin:

- A more complex control system with additional signals should be evaluated
- Routines for automation of virtual acceptance tests including result documentation should be developed
- The installation (software licenses, IT security) should be simplified so that all approved users easily can have access to the digital twin
- Currently the digital twin is not suited for testing of slow controllers and it should be investigated how/if the simulation speed can be increased to more than five times real time

In summary the project shows that, by using digital twins for VAT tests as a complement to FAT and SAT tests, added value can be created.

Sammanfattning

Skärpta villkor för dagens avloppsreningsverk kräver allt mer avancerad och robust processtyrning. I detta projekt har därför en digital tvilling studerats som ett möjligt verktyg för att effektivisera och minimera fel vid driftsättning av nya styrsystem.

Henriksdals reningsverk i Stockholm byggs om och nya styrsystem för den nya reningsprocessen utvecklas. En tidskritisk aspekt är att kontrollera att den nya styrningen är korrekt implementerad vilket idag görs genom s.k. factory acceptance och site acceptance tests (förkortas FAT och SAT). Dessa tester är tidskrävande och kan ta månader att genomföra eftersom de i hög grad utförs manuellt genom att exempelvis utvärdera effekten av ett ändrat signalvärde för var och en av de tusentals signaler och hundratals regulatorer som utgör styrsystemet. Trots det omfattande arbetet är det vanligt att fel upptäcks först efter verklig driftsättning.

I detta projekt studerades hur digitala tvillingar kan komplettera de traditionella testerna, förbättra och effektivisera driftsättningen av ny processtyrning och därmed minska risken för fel. En digital tvilling utvecklades som baseras på en matematisk processmodell (MATLAB®/Simulink®) som kommunicerar med styrsystemet (Siemens, SIMATIC PCS 7) med hjälp av en simuleringsmjukvara (Siemens, SIMIT). Applikationen implementerades på en dator inom anläggningsägaren Stockholm Vatten och Avfalls (SVOA) nätverk vilket förenklar användningen av SVOA:s verkliga styrsystemskod.

I projektet genomfördes försök med att beskriva hur ett virtuellt acceptance test (VAT) kan genomföras på PI-regulatorn. Flertalet realistiska störningar, som inte gått att genomföra med dagens metodik, kunde utvärderas virtuellt. Den största vinsten med applikationen var att styrningen och dess beroenden med processen kunde testas i sin helhet. Enkla fel såsom orimliga regulatorparametrar kan upptäckas. I rapporten exemplifierar vi även att mer svårupptäckta svagheter, såsom avsaknad av antiwindup (som motverkar integraluppvridning) mellan kaskadkopplade regulatorer, kan identifieras genom test med den digitala tvillingen.

En digital kopia av ett realistiskt styrsystem användes i applikationen, där gränssnittet är identiskt med det verkliga. Detta gör även applikationen lämpad för proaktiv operatörsträning och utbildning redan innan processen driftsatts. Det gör det också möjligt för slutanvändaren att i högre grad delta i felsökning, verifiering och optimering av styrsystemet inför driftsättningen. Den digitala tvillingen kan återvändas när processen väl är i drift för virtuell driftoptimering.

Följande aspekter behöver studeras för att fortsatt utvärdera nyttan med den digitala tvillingen

- Utvärdera ett mer komplicerat styrsystem med fler mät-/styr signaler
- Utveckla rutiner för att automatisera testning och dokumentering som idag sker i FAT
- Förenkla installationen (licenser och IT-säkerhet) så att fler användare enkelt kan få tillgång till applikationen
- Undersöka om det går att öka simuleringshastigheten mer än 5 gånger realtid, vilket idag utgör en begränsning för att kunna utvärdera långsamma reglerkretsar.

Sammanfattningsvis så visar detta projekt på stora möjligheter med att tillämpa digitala tvillingar i VAT-tester, som komplement till dagens FAT- och SAT-tester.

1 Introduktion

VA-kollektivet i Sverige står inför stora investeringar om 2-3 miljarder kronor/år för ny- eller ombyggnationer av reningsverk (Carlsson *et al.* 2017). I Stockholmsregionen och på Stockholm Vatten och Avfall (SVOA) specifikt byggs avloppsreningsverken för närvarande om i stora och tidspressade projekt.

Kraven på dagens reningsverk ökar; utgående koncentrationer av både traditionella föroreningsparametrar (BOD₇, kväve, fosfor) och nya fokusämnen som läkemedelsrester behöver kontinuerligt hållas allt lägre, miljöpåverkan genom resursförbrukning (t.ex. energi- och kemikalieförbrukning) och växthusgasutsläpp skall minimeras och biogasproduktionen maximeras. För utbyggnationerna är dessutom ofta platsbrist en utmaning vilket i kombination med ovan leder till att mer avancerade reningstekniker, baserade på till exempel biofilms- och membranteknik, ofta behöver användas.

Utmaningarna innebär också att den automatiska processtyrningen blir både mer komplex och allt viktigare för att målen skall kunna nås. En förutsättning för att processtyrningen ska ge önskat resultat är en korrekt implementering och intrimning av de hundratals regulatorer och tusentals signaler som används inom styrsystemet. Vidare förutsätts det att den operativa personalen är väl införstådd med både processens och styrsystemets funktion samt i hur dessa samverkar.

Henriksdals reningsverk i Stockholm byggs om vilket kräver nya styrsystem för den nya reningsprocessen. En tidskritisk aspekt vid införandet av nya styrsystem är kontrollera att den nya styrningen är korrekt implementerad. Detta görs idag genom s.k. factory acceptance och site acceptance tests (förkortas FAT och SAT). Dessa tester är tidskrävande och kan ta månader att genomföra eftersom de i hög grad utförs manuellt genom att exempelvis utvärdera effekten av ett ändrat signalvärde för var och en av de tusentals signaler och hundratals regulatorer som utgör styrsystemet. Trots det omfattande arbetet är det ändå vanligt att fel upptäcks först efter verklig driftsättning. Detta kan även bero på missförstånd mellan alla aktörer som samverkar under processen att implementera ett styrsystem. Hur själva styrningens processmässiga funktion ska beskrivas i termer av styrsystemskod kan vara svårt att beskriva i text. En ytterligare komplicerande faktor är att intrimning av regulatorerna, vilken är avgörande för önskad funktion, kan göras först efter driftsättning av styrsystemet med den verkliga processen. Kombinationen av möjliga (okända) fel i styrsystemet och intrimning av regulatorer som i sin tur ska styra en ny och för driftpersonal obeprövad process med bibehållen reningsgrad, gör driftsättningsperioden kritisk.

I detta projekt studerades hur digitala tvillingar kan användas för att göra ett virtuellt acceptance test (VAT) och därmed förbättra och effektivisera driftsättningen av ny processtyrning.

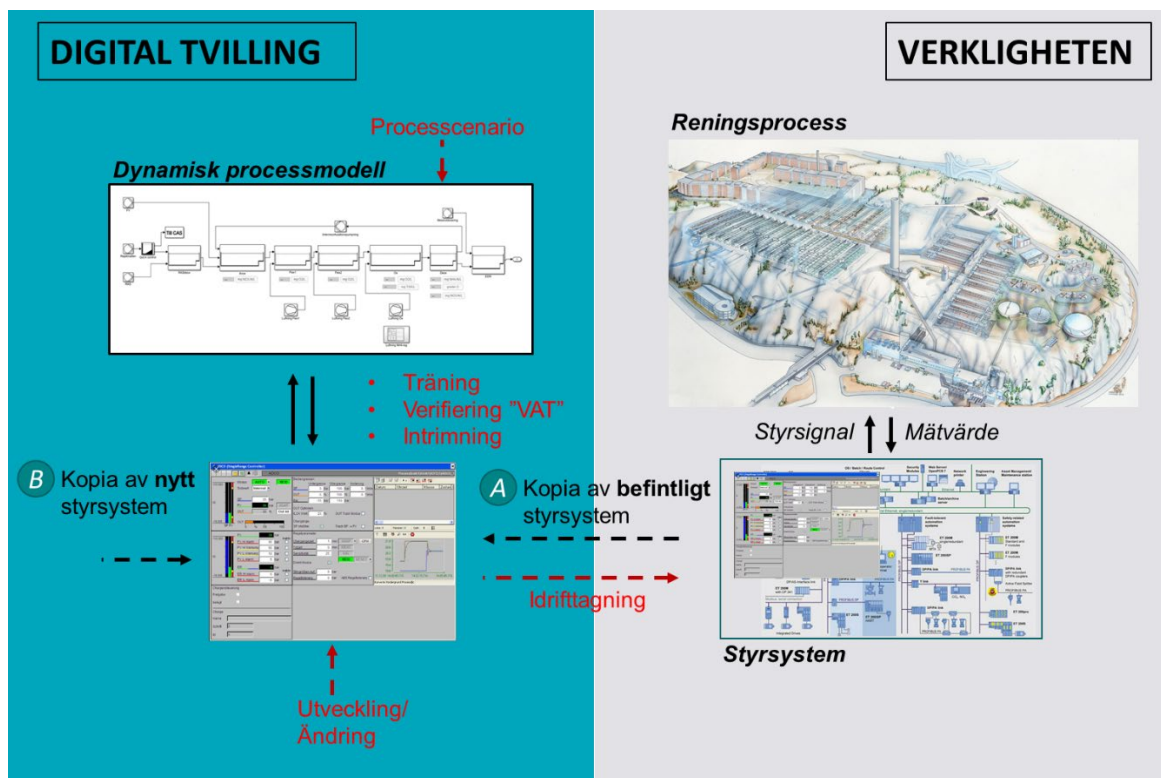
1.1 Projektets vision

Visionen är att det skall finnas en applikation, en digital tvilling, som möjliggör utvärdering av styrsystem på reningsverk utan någon risk att störa den riktiga processen (Figur 1).

Till höger i Figur 1 visas det verkliga reningsverket där reningsprocessen kontinuerlig drivs och kommunicerar med det verkliga processtyrssystemet. Till vänster visas den digitala tvillingen där reningsprocessen ersatts av en dynamisk matematisk processmodell. Denna kan, som i projektets fallstudie, beskriva en ny anläggning eller vara en modell över befintligt reningsverk. I den digitala

tvillingen kommunicerar modellen med och styrs av en exakt kopia av det verkliga styrsystemet. Styrsystemet kan antingen vara:

- en kopia av nytt styrsystem som planeras att tas i drift (Figur 1, Fall B), eller
- en kopia av det befintliga styrsystemet (Figur 1, Fall A).



Figur 1. Schematisk bild över den digitala tvillingen i projektet. Genom att använda en exakt kopia av styrsystemet och koppla denna med en dynamisk processmodell kan ändringar i styrsystemet utvecklas och testas virtuellt (VAT) innan verkliga driftsättning. Operativ personal kan tränas utan risk för att den verkliga processen störs.

En processoperatör ska kunna använda den digitala tvillingen för träning/utbildning och för att förstå styrsystemets funktionalitet och hur processen reagerar på ändringar i inställningar. Det blir praktiskt möjligt genom att

- det riktiga styrsystemets konfiguration och gränssnitt används
- applikationen innehåller en processmodell av den verkliga processen så att denna inte störs
- applikationen har samma beteende och respons som verkligheten
- applikationen kan simulera olika typer av processscenarier och störningar

Programmerare och processspecialister ska kunna använda applikationen för utveckling, felsökning, intrimning och verifiering av ändringar i styrsystemet innan, under och efter verklig idrifttagning. Eftersom många processer på reningsverk är långsamma och har långa svarstider bör den digitala tvillingen kunna simuleras snabbare än realtid.

1.2 Syfte och mål

Syftet med detta projekt var att undersöka om en digital tvilling enligt Figur 1 rent tekniskt kan implementeras samt studera hur denna kan användas för att förbättra och effektivisera idrifttagningen av ny processtyrning på reningsverk. De specifika projektmålen var:

1. Implementera en prototyp för en digital tvilling där befintliga processmodeller i programvaran MATLAB®/Simulink® integreras med styrsystemkod från Siemens styrsystem SIMATIC PCS 7.
2. Demonstrera hur den digitala tvillingen kan användas för intrimning och optimering av regulatorer.
3. Tillämpa den digitala tvillingen för att underlätta test av styrsystemets funktionalitet (VAT-Virtual Acceptance Test).

2 Genomförande

I detta kapitel beskrivs övergripande de ingående komponenterna och uppbyggnaden av den digitala tvillingen. Den nya reningsprocessen, baserad på biologisk rening och membranteknik (MBR) på Henriksdal, som ingår i projektet Stockholms Framtida Avloppsvattenrening (SFA), var grunden för den digitala tvillingen som implementerades på en dator på SVOA:s huvudkontor i Ulvsunda inom det s.k. tekniknätet.

2.1 Stockholms Framtida Avloppsrening

Henriksdals reningsverk i Stockholm drivs av det kommunala bolaget Stockholm Vatten och Avfall (SVOA). Reningsverket består av cirka tio reningssteg där både mekaniska, fysikaliska, kemiska och biologiska processer kombineras och varje processteg består av fem till tio parallella processlinjer.

Från projektstarten 2014 byggs Henriksdals reningsverk om till Sveriges största avloppsreningsverk. Kapacitetsmässigt ska verket kunna rena avloppsvatten från 1,6 miljoner personer. Utsläppskraven på organiskt material och näringsämnen kväve och fosfor är strikta, vilket begränsar belastningen på Östersjön och därigenom minskas negativ påverkan som syrebrist och övergödning. Reningsprocessen inkluderar membranfiltrering och reducerar också halterna av många mikroföroreningar såsom läkemedelsrester och plastpartiklar. Det slam som produceras i reningsprocessen rötas till biogas som uppgraderas till fordonsbränsle. Idag sprids det slam som blir kvar efter rötning på åkermark, och mycket forskning pågår kring hur de näringsämnen som finns i slammet efter rötning ska kunna återvinnas på ett hållbart sätt.

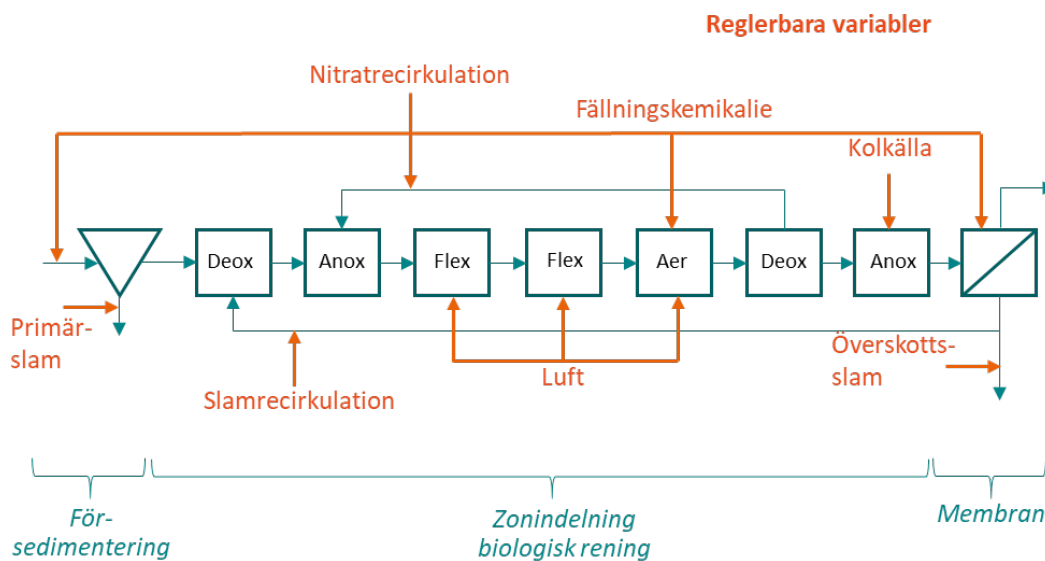
Den biologiska reningsprocessen och Linje 1 (BB01) av totalt sju parallella linjer är det reningssteg som skall driftsättas först i perioden 2020-2021. Befintliga volymer har delats in i ett antal zoner som avgränsas av väggar. I dessa växer och ackumuleras bakterier som omvandlar kväve och organiskt material till kvävgas respektive koldioxid. Fosfor avlägsnas genom kemisk rening så att löst fosfor binds till partiklar. Slam (bakterier och kemiskt bundna fosforpartiklar) hålls kvar i processen genom att utgående vatten filtreras genom membran som installeras i de befintliga eftersedimenteringsbassängerna. Det producerade slammet tas ut som överskottsslam och skickas efter den biologiska reningen vidare till rötning.

2.2 Processmodell

SVOA har i samarbete med bl.a. IVL under lång tid arbetat med att utveckla dynamiska processmodeller för reningsstegen i de befintliga (Bromma/Henriksdal) och planerade (SFA) avloppsreningsverken (se t.ex. Åmand *et al.*, 2016). Med modellerna kan i stort sett alla biologiska, kemiska och fysikaliska reningsprocesser beskrivas och både reningsresultat och resursförbrukning kan simuleras. Genom att även modeller för generering av olika scenarier (t.ex. nuvarande och framtida belastning, kraftiga regnhändelser) och modeller över processtyrssystemen (t.ex. luftning, kemikalietillsats, recirkulationspumpning) har utvecklats kan reningsverken som helhet simuleras verklighetstroget och resurseffektiva styrstrategier kan utvecklas.

2.2.1 Konfiguration

I detta projekt har en befintlig processmodell över den nya MBR-processen använts. Modellen är implementerad i mjukvaran MATLAB®/Simulink® och baseras på det så kallade BSM-systemet (Gernaey *et al.*, 2014). Den inkluderar en modell för försedimentering, biologisk och kemisk rening i sju zoner enligt modellen ASM2d (Henze *et al.*, 2000) och membranfiltrering som modelleras enkelt som ideal avskiljning av partiklar, se Figur 2. Modellen har i tidigare projekt bl.a. använts för att välja processlösning för kväverening och test av styrstrategier för pumpstyrning inklusive utjämning i den nya tunneln från Bromma reningsverk. Modellen har också använts för att utveckla och kommunicera de övergripande styrstrategierna för den nya MBR-processen.



Figur 2. Schematisk bild över konfigurationen av den i projektet använda processmodellen. Reglerbara variabler visas med rött.

En mer detaljerad beskrivning av de ingående modellerna ryms inte i denna projektrapport men det är relevant att nämna några typer av styrning som kan testas och utvärderas med modellen. Genom att variera de reglerbara variablerna (se även röd markering i Figur 2) fås från modellen ett verkligt beteende och respons:

- *Luftflöde till luftade zoner* påverkar koncentrationen av löst syre och de biologiska reaktionerna och utgående koncentration av organiskt material och kväve
- *Koncentration och flöde av fällningskemikalie* påverkar slamhalt och utgående koncentration av löst fosfor
- *Koncentration och flöde av extern kolkälla* påverkar hur mycket kväve som avskiljs i efterdenitrifikationszonen
- *Nitratrecirkulation* från slutet av processen till fördenitrifikationen påverkar hur mycket kväve som fördenitrifieras
- *Recirkulationspumpning av slam* från membran till biobassänger påverkar hur mycket slam (slamhalten) som återfinns i membran- respektive biobassänger
- *Uttag av överskottsslam* påverkar den totala mängden slam i bioprocessen och därmed processens reningskapacitet

Alla dessa styrbara variabler kan kopplas till den digitala tvillingen vilket också redovisas som förslag till vidare arbete. I detta projekt har fokus legat på *styrning av luftning* som påverkar processens reningseffektivitet och energiförbrukning. Denna styrning beskrivs mer detaljerat i Kapitel 3.

2.2.2 Inkommande vatten

Egenskaperna på det inkommande avloppsvattnet anges i modellen som ett dygnsmedelflöde och medelkoncentrationer av organiskt material, kväve och fosfor. Även avloppsvattnets temperatur anges. I modellen finns sedan parametrar och profiler som används för att generera dynamiska indata i form av typiska dygnsvariationer.

2.2.3 Kalibrering och anpassning av processmodell

Modellen över MBR-processen är en vidareutveckling av en modell över befintlig reningsprocess. De flesta parametrar som ingår i modellen har så kallade "default-värden" d.v.s. erfarenhetsbaserade värden som också visat sig stämma väl överens med dagens reningsprocess (Lindblom *et al.*, 2020). Dock är det viktigt att ha i åtanke att MBR-modellen inte är kalibrerad mot den framtida processen (som ännu inte är driftsatt).

2.3 Systemintegration (skapande av den digitala tvillingen)

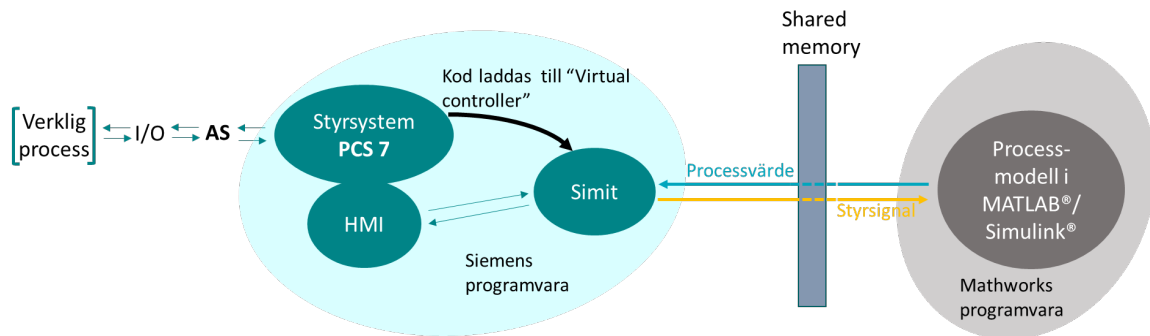
En förutsättning för projektet var att installationen skulle ske så att framtida överföring mellan styrsystemet och den digitala tvillingen skulle vara enkel och samtliga programvaror installerades därför inom tekniknätverket på en dator ("den virtuella maskinen") på SVOA:s huvudkontor i Ulvsunda.

2.3.1 Virtuellt styrsystem

Det befintliga styrsystemet på SVOA:s avloppsreningsverk är Siemens system SIMATIC PCS 7. För att möjliggöra (1) kommunikation mellan den verkliga styrsystemkoden och processmodellen och (2) snabbare simulering än realtid användes Siemens programvara Simit.

Figur 3 visar hur de olika mjukvarorna användes för att skapa den digitala tvillingen. I det vanliga fallet laddas styrsystemkoden i PCS 7 ner till AS-stationerna (automation systems) som kommunicerar med den verkliga processen via I/O:s.

I den digitala tvillingen laddas istället koden ner till en s.k. "Virtual controller" i Siemens program Simit och de verkliga mätvärdena ersätts av processvärden från modellen.



Figur 3. Schematisk bild över mjukvaruintegrationen i projektet. I stället för att ladda ner styrsystemkod till automationsstationerna (AS) laddas koden till mjukvaran Simit. Från Simit kan sedan styrsystemet kommunicera med processmodellen.

2.3.2 Datakommunikation

Applikationen byggdes upp så att processmodellen i MATLAB®/Simulink® kommunicerar med Simit genom att båda programmen delar på en gemensam del i minnet som kallas Shared Memory (SHM) enligt Figur 3 ovan. Detta möjliggör snabbt utbyte av värden mellan de olika systemen. Simit har som fördefinierad funktion att signaler kan skrivas till och läsas från SHM. MATLAB®/Simulink® kan kommunicera med SHM med hjälp av ett C++ - program som genererar en för detta ändamål s.k. MATLAB®S-funktion. Detta utnyttjades i projektet och det var relativt enkelt att läsa in värden från MATLAB®/Simulink® till Simit och vice versa. Då var det en större utmaning att få de två programmen att synkronisera i tid vilket beskrivs nedan.

2.3.3 Synkronisering, försök 1

MATLAB®/Simulink® försöker normalt att simulera en processmodell från start till slut så snabbt som möjligt. Tiden det tar att köra en viss simulering beror bl.a. på modellens komplexitet och diverse inställningar, t.ex. hur mycket resultat som skall sparas och numerisk noggrannhet. Som exempel kan nämnas att den modell som används i detta projekt simulerar ca 35 000 gånger snabbare än verkligheten (ett år tar ca 15 min att simulera) med dynamiska indata och fullt modellerad styrning.

Simit å andra sidan simulerar normalt styrsystemet nära realtid och med fixerade tidsintervall. I det första försöket synkroniserades simuleringen av Simit och simuleringen av MATLAB®/Simulink® med ett Visual-Basic (VB) program som skapas från C#-kod. Programmet är i princip uppbyggt så att varje gång Simit skriver/läser ett värde till/från SHM kallas processmodellen som då tar ett diskret tidssteg framåt i tiden varefter modellen pausas. Storleken på tidssteget ställs till samma värde som det tidsintervall med vilket Simit kommunicerar med SHM. Detta bestäms av Simit-inställningen "time slice".

Efter en del arbete (bl.a. med att hitta och installera rätt version av Visual Basic) fungerade programmet och synkroniseringen så tillvida att Simit och MATLAB®/Simulink® simulerades tillsammans och utbytte signaler. Dock blev tidsstyrningen inte exakt utan applikationen gick alltid långsammare än önskat. Alltså, även om Simit ställdes in att simulera i realtid så simulerade den digitala tvillingen långsammare än realtid. Projektet har inte hittat en klar förklaring till varför synkroniseringsförsöket ovan inte fungerade tillfredsställande.

2.3.4 Simuleringshastighet

Vid planering av projektet och under uppstarten var tanken att applikation skulle kunna gå avsevärt snabbare än realtid. I visionen ingick att det verkliga styrsystemet skulle kunna simuleras och testas med t.ex. ett års realistiska indata (avloppsvatten och störningar). I Synkroniseringsförsök 1 ovan uppdagades det att implementeringen med SIMTAIC PCS 7/Simit inte är utvecklad för att kunna gå mycket snabbare än realtid. Med Simit går det att köra styrsystemet upp till fem gånger snabbare än realtid men användargränssnittet i PCS 7 (där trender visas) kunde inte enkelt snabbas upp.

För reningsverk är detta en utmaning då många av de biologiska processerna är långsamma och att det i praktiken inte är realistiskt att behöva vänta ett par veckor för att se resultaten av ett scenariotest. Stora delar av styrsystemet kan dock testas och utvärderas i realtid och givet projektets förutsättningar togs ett beslut om att fortsätta utvecklingen mot målet att ta fram ett verktyg som kunde köras upp till 5 gånger snabbare än realtid. Framtida arbete får visa på möjligheter att simulera det verkliga styrsystemet snabbare.

2.3.5 Synkronisering, försök 2

Ett nytt försök att synkronisera tiden mellan Simit och MATLAB®/Simulink® gjordes. Ansatsen var att bägge programmen skulle implementeras för att gå i realtid oberoende av varandra. Därigenom kunde VB-programmet tas bort från applikationen.

Simit ställdes till att gå i realtid oberoende av övriga komponenter. Istället för att gå i "synkront" läge användes inställningen "asynchronous operating mode". För processmodellen visade det sig finnas en rad möjligheter att sakta ner simuleringshastigheten i MATLAB®/Simulink®. Efter att ha testat några olika metoder visade sig ett Simulink-block som finns tillgängligt (<https://se.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/29107-real-time-pacer-for-simulink>) ge bra resultat.

Med metoden ovan blir samplingsstegen för de två programmen oberoende av varandra. Det viktiga är att bägge går med samma hastighet. I projektet har följande inställningar använts:

- Simit körs med en time slice på 100 ms och läser/skriver alltså data från/till SHM 10 gr per sekund.
- MATLAB®/Simulink® körs med diskret tidssteg på 500 ms och läser/skriver alltså data från/till SHM 2 gr per sekund.

2.3.6 Licenser

Den digitala tvillingen är uppbyggt av flera program/mjukvaror som alla behöver ha giltiga licenser. För t.ex. MATLAB®/Simulink® fanns en (1) licens för en (1) specifik användare och under detta projekt har det alltså bara varit en (1) användare som har kunnat logga på den "virtuella maskinen" och ändra, köra och titta på den digitala tvillingen. Det är inte uppenbart hur licenser för en digital tvilling med ingående mjukvara skall utformas. Licenser brukar väljas utifrån hur programvaran skall användas. För den digitala tvilling som utvecklats i detta projekt är ett tänkbart framtida upplägg på användare enligt följande:

- en eller ett fåtal (utvecklare/modellexperter) personer vill kunna komma åt tvillingen och göra ändringar i processmodellkoden

- ett större antal användare (process-/drift- och automationsingenjörer) vill kunna göra ändringar i indata till tvillingen, t.ex. ändra inflödesscenario
- ett stort antal personer från hela verksamheten vill kunna göra mindre ändringar i driftsinställningar och titta på resultat från tvillingen.

Innan man går från prototyp som i detta projekt till implementering i verksamheten behöver licensupplägg och kostnad för sådan studeras.

2.3.7 Tillgänglighet

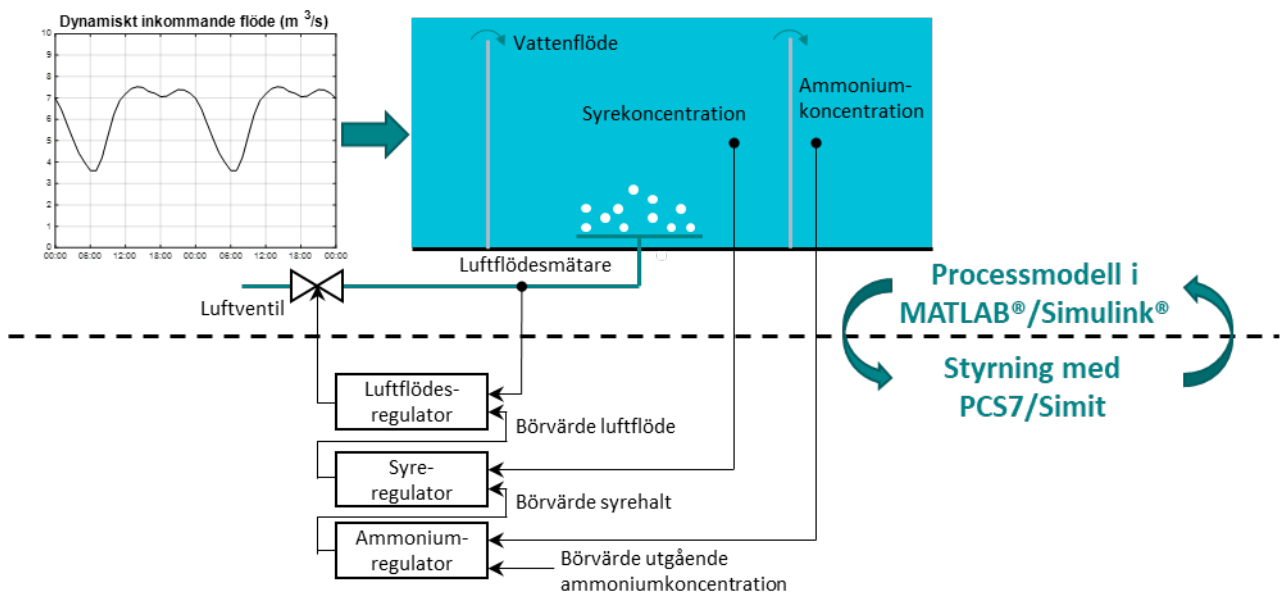
Det var periodvis en utmaning att rent praktiskt kunna arbeta med den digitala tvillingen. Inledningsvis var det av säkerhetsskäl enbart SVOA:s IT-ansvariga i projektet som hade åtkomst till den fysiska datorn. Efterhand lättades det på detta säkerhetskrav och det blev möjligt för externa användare att använda datorn genom en s.k. VPN-tunnel. Först genom att förboka tider, men slutligen med fri inloggning under hela dygnet. Trots att tillgängligheten till den digitala tvillingen utökades succesivt, krävdes tidsödande manuell omstart ca varannan vecka. Detta på grund av att den virtuella datorn hade periodvisa "servicefönster".

3 Fallstudie: styrning av luftning

Huvuddelen av arbetet har utgått från ett mindre styrsystemprojekt där PI-reglering av luftning och syretillförsel till den biologiska reningen studerades. Syrestyrningen är viktig dels för att syrehalten i vattnet har en stor påverkan på reningseffektiviteten dels därför att syretillförseln är en av de mer energikrävande komponenterna av ett reningsverk. Fallstudien baseras på den framtida styrstrategin för den nya MBR-processen.

3.1 Reglerkretsen för luftflöde

Styrstrategin för lufttillförsel i den framtida MBR-processen baseras på en s.k. kaskadreglering, där den överordnade regulatorn (eng. master controller) styr mot en konstant halt av utgående ammoniumkväve, se Figur 4. Två underordnande regulatorer (eng. slave controller), för syre och luftflöde, styr i sin tur luftflödesbörvärde och ventilläge. Även nuvarande luftreglering på Henriksdals reningsverk styrs med ammoniumåterkoppling i kaskad, se Åmand (2015) för ytterligare beskrivning. Rent generellt består majoriteten av reglerkretsar av PI-regulatorer och det var därför lämpligt att utgå från denna typkrets som fallstudie. Samtliga regulatorer (luftflödesregulator, syreregulator och ammoniumregulator) var PI-regulatorer.



Figur 4. Principiell bild över den studerade reglerkretsen för luftflöde som använts som fallstudie i projektet.

Regulatorer av typen PIDConL (standardblock i Siemens SIMATIC PCS 7) valdes för de tre ingående regulatorerna och kopplades ihop i PCS 7. De tre PI-regulatorerna ställdes in så att de räknar med de fysikaliska värden, se vidare Avsnitt 4.2.2.

3.2 Signalutbyte inom den digitala tvillingen

Mätsignalerna som skickas **från processmodellen till styrsystemet** är:

1. Koncentrationen av ammoniumkväve ($\text{NH}_4\text{-N}$) i processens efterdenitrifikationszon.
2. Koncentrationen av löst syre (O_2) i processens ox-zon.
3. Luftflödet i en av två nedledare till ox-zonen.

Styrsignalen som skickas **från styrsystemet till processmodellen** är

1. Ventilöppningsgraden för luftventilen.

Vid projektets start fanns ingen modell för ventildynamiken (d.v.s. hur snabbt ventilen öppnar/stänger) och för att kunna studera hela reglerkretsen fick därför en sådan tas fram. Detta beskrivs nedan.

3.3 Utveckling av processmodell för luftflödesdynamik

I den befintliga processmodellen för Henriksdal saknades den delmodell som beskriver förhållandet mellan luftflöde och ventilöppningsgrad. En sådan modell krävs för att simulera luftflödesregleringen på ett verklighetstroget sätt. En ventilmodell konstruerades därför för reglerdonet (ventilen) utifrån ventilkarakteristiken på de framtida luftregleringsventilerna.

Ventilens karakteristik, d.v.s. hur flödet genom ventilen påverkas av dess öppningsgrad, beskrivs i en tabell med s.k. Kv-värden. Dessa Kv-värden har tagits fram av tillverkaren genom standardiserade tester och användes för att räkna ut luftflödet genom ventilen vid ett givet tryckfall.

Hur snabbt ventilen ändrar sitt läge (ventilens dynamik) kan justeras på ställdonet, en s.k. positioner. Denna har en tidskonstant på några sekunder enligt tillverkaren, vilket verifierades med stegvarsförsök på motsvarande ventil på Bromma reningsverk. Även mätbrus i luftflödesmätningen uppskattades med stegvarsförsök på Bromma reningsverk.

Den slutliga ventilmodellen implementerades sedan i processmodellen utifrån Kv-data från tillverkaren och de parametrar som identifierats i försök på motsvarande ventiler på Bromma reningsverk. Ventilens dynamik implementerades som en första ordningens överföringsfunktion med tidskonstanten 2,5 sekunder. Tryckfallet över ventilen antogs vara 0,1 bar, vilket var tryckfallet på motsvarande ventil på Bromma reningsverk. Ventilmodellen validerades genom att jämföra modellens simulerade luftflöde och ventilöppningsgrad med uppmätta värden från stegvarsförsöken.

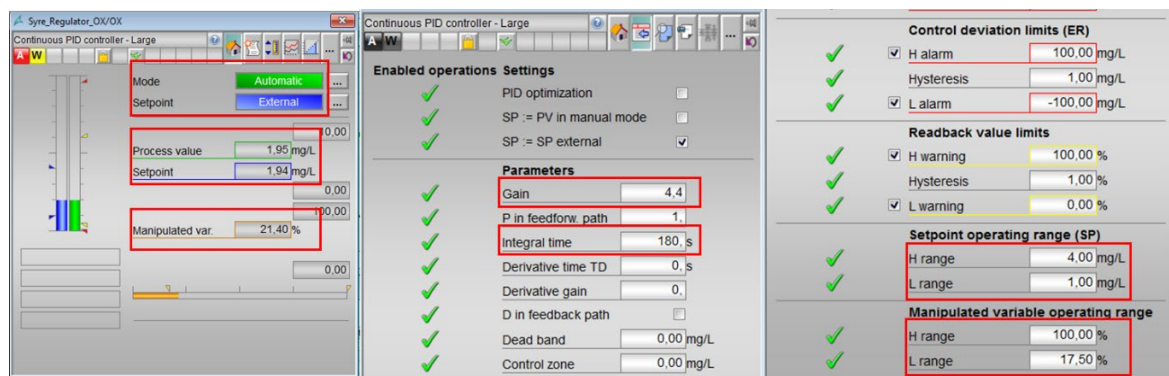
4 Resultat

I detta kapitel demonstreras några exempel på hur den digitala tvillingen kan användas för att testa och utvärdera styrsystem. Dessa inkluderar intrimning av regulatorparametrar och test av funktionalitet vid diverse processtörningar. Härledda värden på regulatorparametrar gäller under förutsättning att modellen stämmer överens med den verkliga processen. Intrimningen är gjord med en reglerkrets som är framtagen specifikt för detta projekt (Avsnitt 3.1) och parametervärdena är därför inte direkt överförbara till det verkliga styrsystemet. T.ex. kan inställningar som skalning av mät- och styrsignaler skilja sig åt. De i Avsnitt 4.2 och 4.3 redovisade värdena skall därför ses som ungefärliga. I exemplen som illustrerar hur tvillingen kan användas för att identifiera problem med integraluppvridning bör det poängteras att det är ett hypotetiskt styrsystemprojekt som utvärderas. I SIMATIC PCS 7 finns också funktionalitet som kan användas för att motverka dessa typer av problem.

4.1 Översikt

Den digitala tvillingen finns nu tillgänglig på en dator inom SVOA:s teknikkö. Den fallstudie som implementerats i projekt kan köras utan kända problem. Med processmodellen i MATLAB®/Simulink® kan scenarier med diverse processtörningar och ändringar i inkommande avloppsvatten testas.

I det för projektet uppbyggda styrsystemet kan användaren titta på resultat och göra ändringar i inställningar i en miljö som är identisk med den verkliga styrsystemmiljön. Några av regulatorernas parametervärden och inställningar som kan justeras i applikationen visas i Figur 5 och sammanfattas nedan. För en komplett beskrivning av regulatorblockets (PIDConL) funktionalitet hänvisas till användarmanualen för SIMATIC PCS 7.



Figur 5. Principiell bild över parametervärden och inställningar för en av tre regulatorer som användaren kan se i den digitala tvillingen.

Som *Läge (Mode)* kan man välja om regulatorn är i automatik eller manuell. *Styrsignalen (Manipulated variable)* är den signal som regulatorn skickar ut. Om läget är satt till manuellt anges värdet manuellt. Om regulatorn ställs till *Auto (Automatic)* beräknas styrsignalen av regulatorn. Startvärdet blir det värde som angavs manuellt.

Processvärdet (Process value) eller mätsignalen (kommer i detta projekt från processmodellen) är det värde som regulatorn jämför med börvärdet. *Börvärdet (Setpoint)* är det värde som önskas uppnås

och kan vara *Externt* (*External*) om det kommer från extern källa, ofta en överordnad regulator, eller *Manuellt* (*Manual*) då det anges manuellt.

Förstärkningen K_P (*Gain*) och *Integreringstiden* T_i (*Integral time*) är parametrar som avgör hur snabb regulatorn är.

Gränser för börvärde (*Setpoint operationing range*) kan sättas för att begränsa regulatorns arbetsområde.

Även *styrsignalbegränsning* (*Manipulated operating range*) kan sättas för att begränsa regulatorns arbetsområde.

4.2 Regulatorintrimning med den digitala tvillingen

En uppgift inför driftsättning av nya system är att definiera regulatorers parametrar, s.k. regulatorintrimning. För detta behöver man förstå processens dynamik, vilken kan uppskattas med exempelvis stegvarsförsök. I detta avsnitt illustrerar vi möjligheterna med att i förväg trimma regulatorerna med hjälp av den digitala tvillingen. För mer detaljer om intrimning av den studerade syrerregleringen med ammoniumåterkoppling, se Åmand (2015). Efter intrimning kan man även använda den digitala tvillingen för att utvärdera styrningens störningsundertryckningsförmåga, vilket demonstreras i Avsnitt 4.3.

4.2.1 Lambdametoden

För att trimma in regulatorparametrarna K_P och T_i användes som första ansats i detta projekt den så kallade lambdametoden, en tumregelsmetod som är vanligt förekommande i processindustrin. Metoden bygger på följande steg:

1. Regulatorn sätts i manuellt läge och styrsignalen ändras i ett steg med amplituden u_s .
2. Stegsvaret mäts och ökningen i processignalen betecknas med y_s .

Enligt lambdametoden väljs T_i som systemets tidskonstant d.v.s. den tid det tar att uppnå 63 % av ökningen i styrsignalen. För den exakta beräkningsgången av K_P hänvisas till t.ex. Carlsson och Hallin (2010) där lambdametoden finns utförligt beskriven. Man kan notera att K_P är omvänt proportionell mot *systemets förstärkning* (y_s/u_s), d.v.s. $K_P \sim u_s/y_s$. Om en liten ändring i styrsignalen ger upphov till en stor ändring i processvärde blir alltså värdet på K_P lägre jämfört med det motsatta fallet.

4.2.2 Skalning av signaler

I SIMATIC PCS 7 liksom i andra kommersiella styrsystem går det att välja om man vill att regulatorn skall arbeta med fysikaliska eller standardiserade enheter. I Henriksdals nuvarande styrsystem är de regulatorer som studeras i denna rapport inställda så att, även om processvärdet och reglerfelet visas med fysikaliska enheter, så räknar regulatorn internt med procentenheter, baserat på processvärdets (mätsignalens) skalning (max- och minvärde). Det värde på K_P som beräknas genom avläsning i punkt 1-2 ovan behöver då multipliceras med faktorn $(y_{min}-y_{max})/100$ innan det ställs i

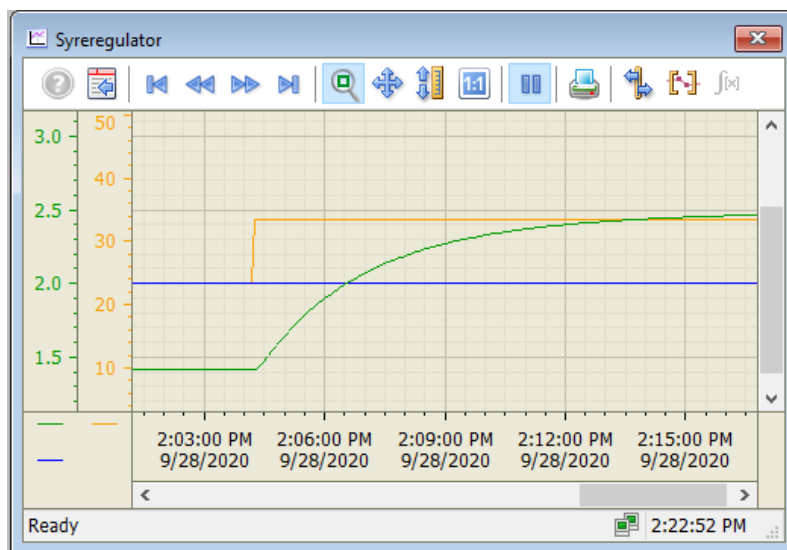
styrsystemet. Detta gäller förutsatt att regulatorn är inställd så att den internt ger en styrsignal i intervallet 0-100 %.

4.2.3 Intrimning av luft- och syreregulatorn

Både luftflödes- och syreregulatorn trimmades in på samma sätt. Nedan redovisas förfarandet vid intrimning av syreregulatorn.

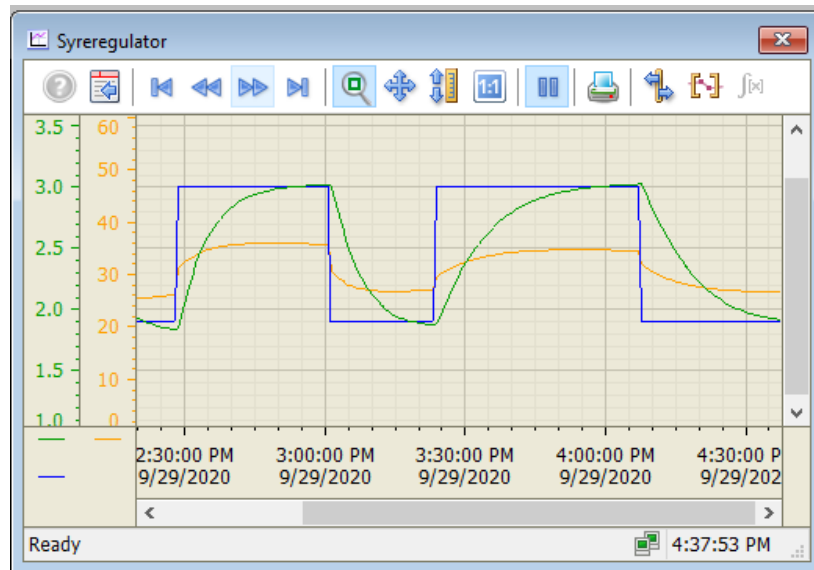
För att ta fram realistiska värden på syreregulatorns förstärkning och integreringstid simulerades ett stegsvarsexperiment med den digitala tvillingen, se Figur 6. Regulatorn sattes i manuellt läge och styrsignalen sattes till 23,5%. Efter att syrekoncentrationen stabiliserats ökades styrsignalen till 33,5%. Styrsignalen (0-100 %) skalas om till ett luftflöde som går in som börvärde till luftflödesregulatorn (0-16000 Nm³/h). Denna var ställd i automatik med trimmade parametervärden.

Syrehalten i det simulerade experimentet ökar från 1,4 mg/l till 2,5 mg/l och det tar ca 3 min (180 s) från det att syrehalten börjar öka till dess att 63 % av den totala ökningen uppnåtts. Detta kallas för systemets tidskonstant och är det värde som valdes som startvärde för integreringstiden T_i . Realistiska värden på K_P beräknades till intervallet 2,2-8,6 där regulatorns snabbhet ökar med ökande värde på K_P .



Figur 6. Stegsvarexperiment med syreregulatorn. Orange linje: styrsignal (luftflödesbörvärde). Grön linje: processvärde (syrehalt i mg/l). Blå linje: Börvärde (ej aktiverat).

I Figur 7 visas resultat där regulatorprestandan testas genom att variera börvärdet. Med $K_P=4,4$ (den första pulsen) tar det ca 23 min för processen att öka syrehalten från 1,9 mg/l till 3,0 mg/l. Med $K_P=2,2$ (den andra pulsen) blir förloppet långsammare och samma ökning i syrehalt tar 31 min. I det fortsatta arbetet har $T_i=180$ s och $K_P=4,4$ använts.



Figur 7. Intrimning av syreregulatorns förstärkning (K). Orange linje: styrsignal. Grön linje: processvärde (syrehalt i mg/l). Blå linje: Börvärde (syrehalt i mg/l).

De redovisade värdena på K_P avser omvandling av det fysiska reglerfelet i enheten mg O_2/l till luftflöde i Nm^3/h . Om regulatorn var inställd att arbeta med standardiserade värden, och mätintervallet är 0-10 mg O_2/l , skulle de behöva minskas med en faktor $10/100=0,1$.

För luftflödesregulatorn blev $T_i=2,5$ s och K_P beräknades till intervallet 0,0016-0,003. Om regulatorn var inställd att arbeta med standardiserade värden, och mätintervallet var 0-8 000 m^3/h , skulle värdena på K_P behöva ökas med en faktor $8\ 000/100=80$.

4.2.4 Val av parametervärden för ammoniumregulatorn

Jämfört med luftflödes- ($T_i=2,5$ s) och syreregulatorn ($T_i=180$ s) är ammoniumregulatorn signifikant långsammare och därför är det inte praktiskt att härleda regulatorinställningar genom stegsvarsexperiment med en digital tvilling som går i realtid. Som startvärde i detta projekt utgick vi därför från ungefär de värden som är implementerade på Henriksdal idag och integreringstiden sattes till 2,4 h.

Dagens värde på K_P är -0,01 och mätintervallet för ammonium är 0-15 mg/l. För att omvandla detta till ett motsvarande värde i den digitala tvillingen behöver man förstå hur regulatorerna är implementerade. Som nämnts tidigare räknar den digitala tvillingen med fysikaliska enheter och det standardiserade K_P -värdet behöver därför multipliceras med en faktor $100/15$ vilket ger -0,067. Vidare, på Henriksdal omvandlas regulatorns utsignal i % direkt till en syrekonzentration. En utsignal på 1 % ger alltså 1 mg O_2/l som börvärde. I den digitala tvillingen är utsignalen skalad så att 0-100 % i motsvarar 0-4 mg O_2/l som externt börvärde i syreregulatorn. För att räkna om $K_P=-0,067$ till den digitala tvillingen behöver då värdet multipliceras med $100/4$ vilket ger $K_P = -1,67$.

För fortsatt utvärdering av ammoniumregulatorn användes $T_i=2,4$ h och $K_P = -1,75$.

4.3 Test av styrsystemets funktionalitet med den digitala tvillingen

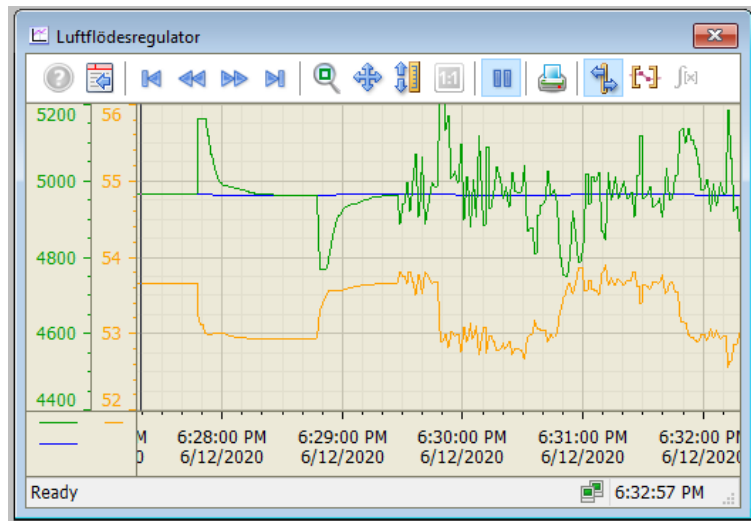
Med den digitala tvillingen är det relativt enkelt att generera olika störningar och scenarier så att regulatorinställningarna kan testas under realistiska förhållanden.

4.3.1 Processtörning luftflöde

I exemplet nedan (Figur 8) har två processtörningar som påverkar luftflödet lagts till i processmodellen. Störningarna innebär att:

1. Luftflödet vid en viss ventilöppningsgrad periodisk ökas med 4 % under 1 minut varannan minut. En sådan störning kan uppkomma om trycket i manifoldern ändras t.ex. beroende p.g.a. intermittent luftning i annan processenhet (gemensam luftmanifolder).
2. I den andra halvan av figuren har dessutom realistiskt mätbrus adderats till luftflödesmätaren.

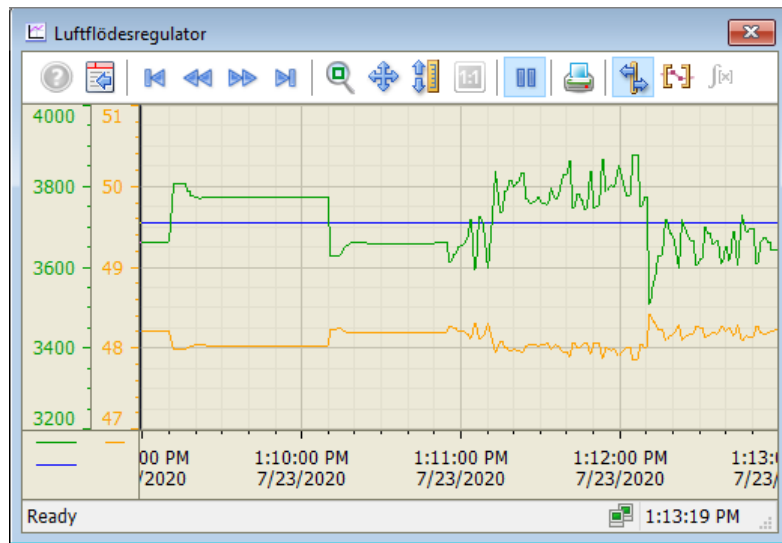
Den totala perioden som visas är drygt 4 minuter och inkluderar alltså två hela störningar. Regulatorn svarar genom att styrsignalen (i detta fall ventilöppningsgraden) minskas från ca 53,7 % till ca 53 % för att (det här konstanta) luftflödesbörvärdet skall hållas. Ur figuren kan man utläsa att regulatorn klarar att reglera bort processtörningen väl. Ventilöppningsgraden minskas direkt när luftflödet ökar och det tar ca 10 s innan luftflödet återigen är nära börvärdet.



Figur 8. Prestandatest av luftflödesregulatorn (Snabb inställning. $K_P = 0,0016$, $T_i = 2,5$ s) med processtörning och mätbrus (andra halvan). Orange linje: styrsignal. Grön linje: processvärde (luftflöde i m^3/h). Blå linje: Börvärde (ej aktiverat).

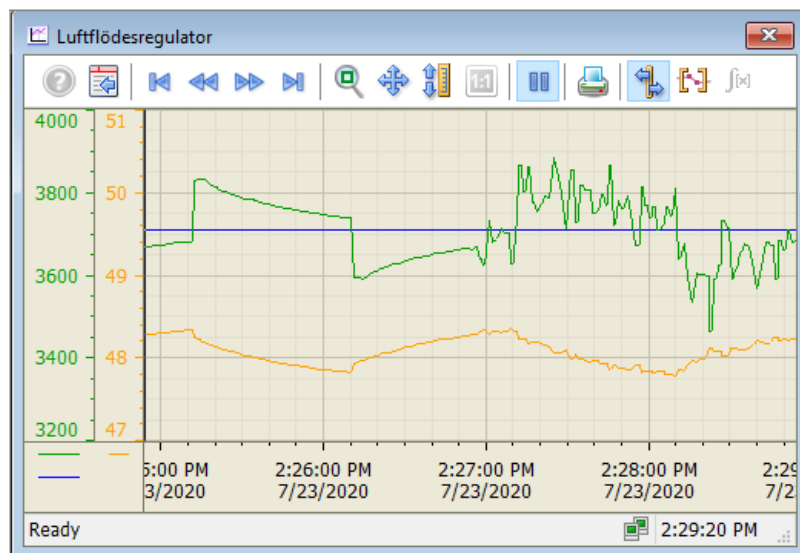
Den snabba regulatorn har en nackdel och det är att mätbruset i luftflödesmätningen får ett ganska stort genomslag på reglerventilen. Detta kan motverkas genom att processvärdet förfiltreras innan den går in i regulatorn. En annan metod, som ger ett liknande resultat, är att öka integreringstiden i regulatorn.

I Figur 9 nedan har en simulering gjorts motsvarande den ovan men med en signifikant längre integreringstid (ökning från 2,5 s till 300 s). Regulatorn reagerar på processtörningen men är alltför långsam för att reglera bort felet.



Figur 9. Prestandatest av luftflödesregulatorn (Långsam inställning. $K_P=0,0016$, $T_i=300$ s) med processtörning och mätbrus (andra halvan). Orange linje: styrsignal. Grön linje: processvärde (luftflöde i m^3/h). Blå linje: Börvärde (luftflöde i m^3/h).

Istället för att öka integreringstiden kan man testa att minska K_P (förstärkningen). Ett sådant test är gjort i Figur 10 nedan. Regulatorn svarar på processignalen och utsignalen är mindre brusig.



Figur 10. Prestandatest av luftflödesregulatorn (Långsam inställning. $K_P=0,0005$, $T_i=2,5$ s) med processtörning och mätbrus (andra halvan). Orange linje: styrsignal. Grön linje: processvärde (luftflöde i m^3/h). Blå linje: Börvärde (luftflöde i m^3/h).

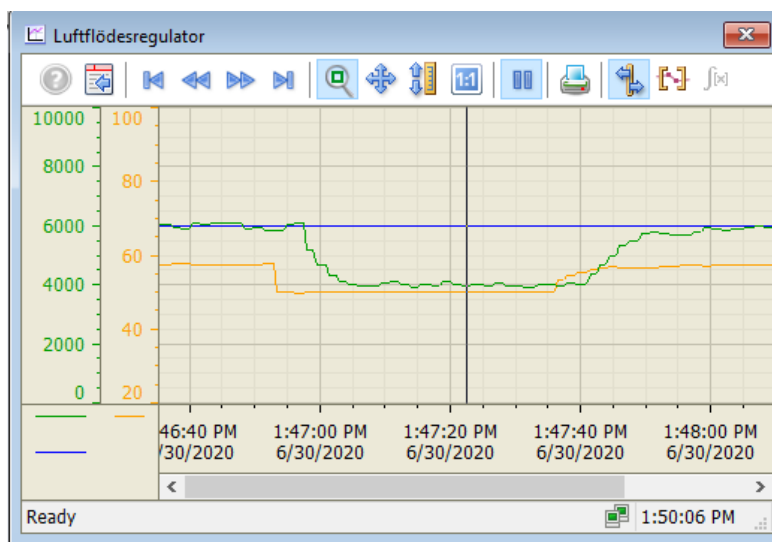
Exemplet ovan visar på att det ofta är en avvägning mellan hur snabbt regulatorn skall reagera på en processtörning och hur känslig den är för mätbrus. Det skall också nämnas att det här studerade scenariot är en svår utmaning för regulatorn eftersom variansen i mätbruset är i samma

storleksordning som effekten av den flödesförändring som sker genom den simulerade tryckvariationen.

4.3.2 Anti-windup internt i regulatorn

I detta scenario ändras inställningar lokalt i regulatorn för att, med den digitala tvillingen, undersöka virtuellt om den använda PI-regulatorn har tillfredsställande "anti-windup"-funktionalitet. Integratoruppvridning (eng. windup) innebär att I-delen i PID-regulatorn fortsätter att växa trots att regulatorn nått sitt min- eller maxvärde. De flesta kommersiella PID-regulatorer har inbyggd så kallad "anti-windup"-funktionalitet vilket innebär att regulatorn "fryser" när mättnad uppnåtts och då slutar integrera (summera) reglerfelet.

I Figur 11 nedan har ett internt (konstant) börvärde på 6 000 Nm³/h först angetts i luftflödesregulatorn. Styrsignalen som krävs för att ge detta luftflöde är ca 57 %. Därefter begränsades utsignalen till max 50 % och luftflödet blir då ca 4 000 Nm³/h. Efter 45 sekunder tas utsignalbegränsningen bort. Reglerfelet har då varit 6 000-4 000=2 000 m³/h i 45 sekunder. Enligt resultaten i figuren ger regulatorn inte ett svängigt svar utan ökar stabilt som önskat. Detta verifierar att regulatorn internt har en inbyggd anti-windupfunktion.



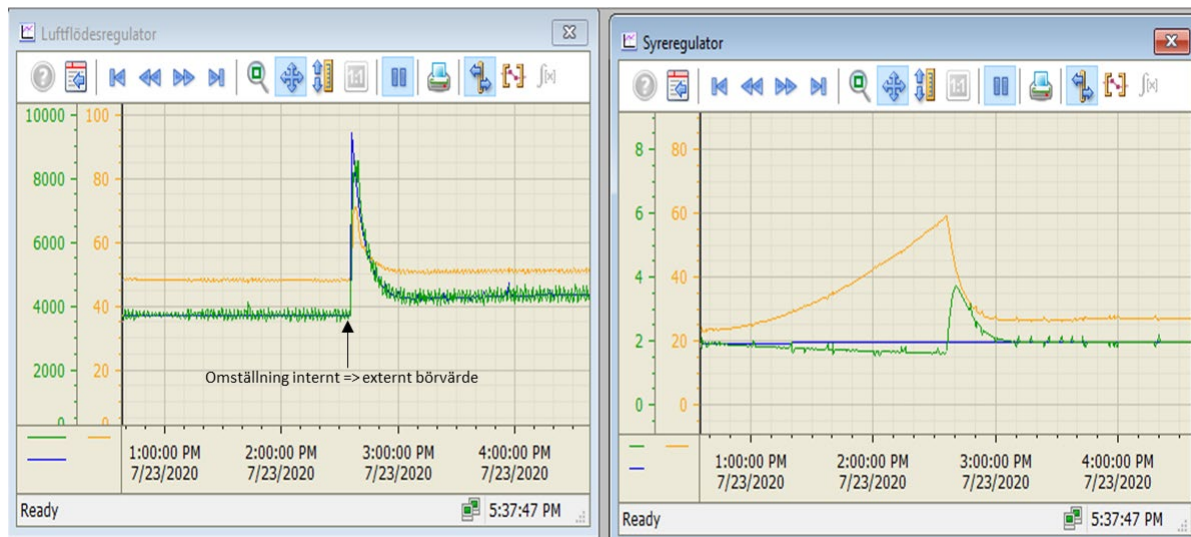
Figur 11. Test av anti-windupfunktionalitet i luftflödesregulatorn genom periodvis begränsning av styrsignal till 50 %. Orange linje: styrsignal. Grön linje: processvärde (luftflöde i m³/h). Blå linje: Börvärde (luftflöde i m³/h).

4.3.3 Anti-windup inom kaskadregleringen, ändring från externt till internt börvärde

Om man som i detta fall har en kaskadreglering med flera ingående regulatorer kan problem med integratoruppvridning uppstå t.ex. om den underordnade regulatorn mättar. Om inte den överordnade regulatorn får veta detta kan då dennas integraldel fortsätta att förändras trots att kretsen som helhet tappat sin styrförmåga.

Ett tydligt exempel på integraluppvridning uppstod då prestandatestet för luftflödesregulatorn genomfördes. Luftflödesbörvärdet sattes där i internt läge med värde enligt det aktuella

syrebehovet. Under eftermiddagen ökade detta och syrehalten sjönk då under syrebörvärdet, se Figur 12. Syreregulatorn vet inte att den tappat styrförmågan och fortsätter summera reglerfelet så att styrsignalen ökar. Ungefär kl. 2:45 PM ställdes luftflödesregulatorn åter i externt börvärde. Syreregulatorn hade då hunnit vridas upp till 60 % vilket ger en kraftig ökning i luftflödesbörvärde. Syrehalten ökar till nästan 4 mg/l och det tar 15 min innan det återigen når börvärdet.



Figur 12. Test av anti-windupfunktionalitet i syreregulatorn då luftflödesregulatorns börvärde väljs till internt. **Vänster:** Orange linje: styrsignal. Grön linje: processvärde (luftflöde i m³/h). Blå linje: Börvärde (luftflöde i m³/h). **Höger:** Orange linje: styrsignal. Grön linje: processvärde (syrehalt i mg/l). Blå linje: Börvärde (syrehalt i mg/l).

En lösning på detta problem hade varit att implementera styrningen så att syreregulatorn får information när luftflödesregulatorns börvärde är satt i internt läge och då slutar summera reglerfelet.

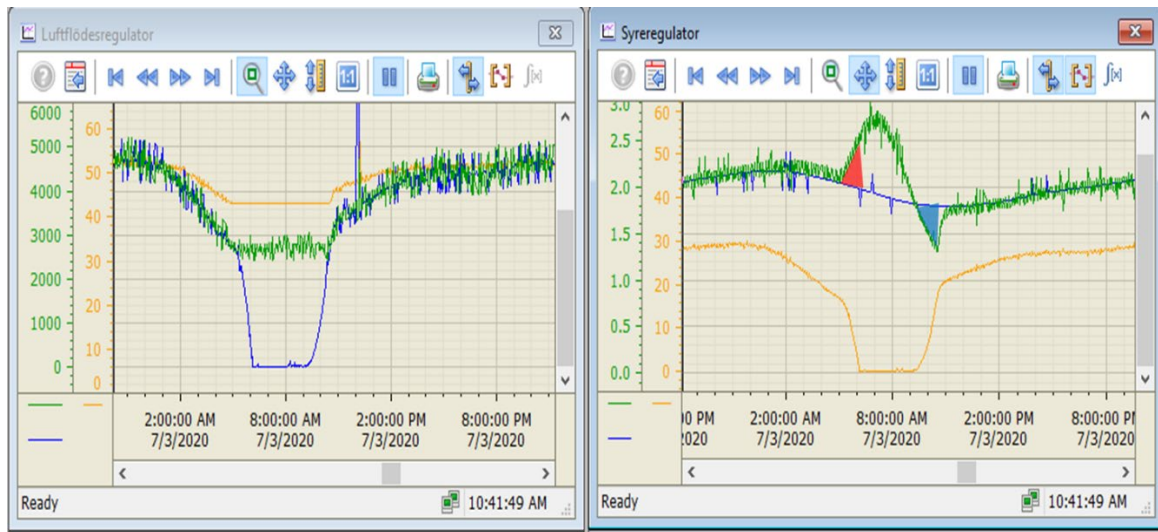
4.3.4 Anti-windup inom kaskadregleringen, inställning av min- och maxgränser

Ett annat exempel på när problem med integraluppvridning kan uppstå i kaskadreglering är när inte min/max-gränser mellan de ingående regulatorerna matchar. I exemplet nedan har ett min-luftflöde satts i luftflödesregulatorn, t.ex. för att säkerställa att det aktiva slammet alltid skall hållas i suspension.

Begränsningen på utsignalen från luftflödesregulatorn är satt till 43 % vilket motsvarar ett luftflöde på ca 2 800 m³/h. Den blå linjen i figuren över syreregulatorn (Figur 13 till höger) visar det syrebörvärde som bestäms av ammoniumregulatorn. Ungefär kl. 05:00 är värdet 2,0 mg O₂/l och syreförbrukningen i processen så låg att erforderligt luftflöde underskrider det satta min-luftflödet. Luftflödesregulatorn fryser då på 43% vilket ger det konstanta min-luftflödet.

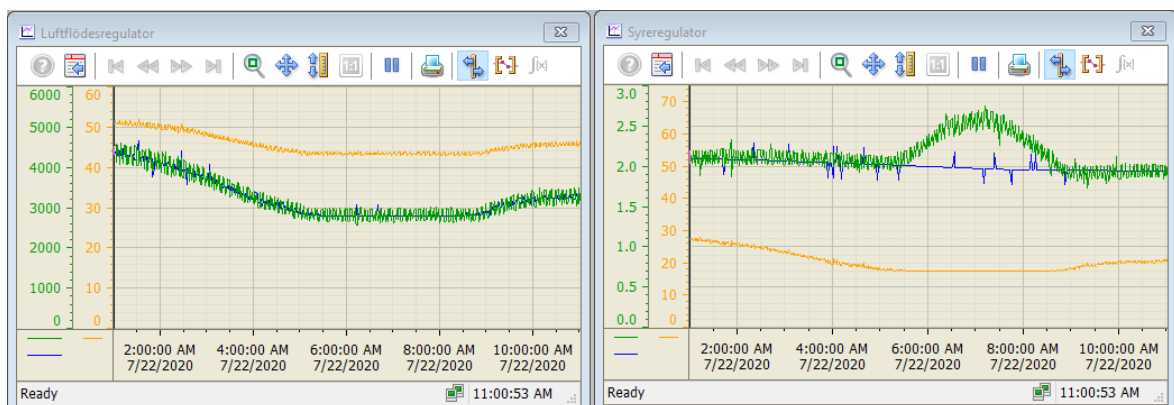
I Figur 13 till höger (syreregulatorn) syns då att syrekoncentrationen ökar till högre värden än börvärdet (reglerfelet blir negativt) och syreregulatorn vill minska luftflödet genom att sänka styrsignalen (luftflödesbörvärdet) som sjunker till noll. Ungefär kl. 07:00 har syreförbrukningen ökat så att syrekoncentrationen börjar minska vid det fortsatt konstanta min-luftflödet. Vid kl. 09:00 passerar syrekoncentrationen under syrebörvärdet och styrsignalen (luftflödesbörvärdet) börjar öka.

Innan syreregulatorns styrsignal blev 0 och regulatorn mättade summerades ett negativt reglerfel som illustreras av den röda arean i Figur 13. Detta måste kompenseras av ett positivt reglerfel (den blå arean) innan önskvärt börvärde kan uppnås.



Figur 13. Test av anti-windupfunktionalitet i kaskadregleringen då luftflödesregulatorn når sitt minvärde. **Vänster, luftflödesregulator:** Orange linje: styrsignal. Grön linje: processvärde (luftflöde i m^3/h). Blå linje: Börvärde (luftflöde i m^3/h). **Höger, syreregulator:** Orange linje: styrsignal. Grön linje: processvärde (syrehalt i mg/l). Blå linje: Börvärde (syrehalt i mg/l).

För att undvika att syrehalten skall bli lägre än börvärdet hade det återigen varit önskvärt att syreregulatorn visste när luftflödesregulatorn mättades så att syrebörvärdet då kunde frysa. Det finns inbyggd funktionalitet i SIMATIC PCS 7 som kan läggas till för att automatiskt hantera denna typ av integraluppvriddningsproblem som dock inte testats i projektet. Ett sätt att "manuellt" komma förbi problemet är att ange min- och maxgränserna för syreregulatorns styrsignal så att dessa överensstämmer med luftflödesregulatorns inställningar. Nedan visas en simulering motsvarande ovan men där en begränsning satts i syreregulatorn så att det minsta luftflödesbörvärdet som kan ställas ut är $2800 \text{ m}^3/\text{h}$ (17,5%).



Figur 14. Simulering av scenario med låg belastning. I detta fall har gränsvärdena för den överordnade syreregulatorn anpassats till inställningarna av luftflödesregulatorn och inga problem med integraluppvriddning kvarstår. Blå linje – börvärde. Grön linje – processvärde. Orange linje – styrsignal.

4.3.5 Processtörning i inkommande vatten

Med den digitala tvillingen går det att utvärdera styrsystemet mot diverse scenarier i inkommande flöde, föroreningsbelastning och ändrad temperatur. För att demonstrera detta och samtidigt testa valet av parametrar för ammoniumregulatorn (Avsnitt 4.2.4) simulerades ett långvarigt högt flöde med kallt vatten. En sådan situation kan uppstå under början på våren vid snösmältning. Följande justeringar för egenskaperna på inkommande vatten gjordes under tre dygn (markerade som de skuggade areorna i Figur 15):

- Inkommande flöde multiplicerades med en faktor 1,6 (ger 10 m³/s på 6 linjer vilket är Q_{\max} för MBR-processen) och ställdes till ett fast (konstant) flöde
- Alla koncentrationerna dividerades med faktorn 1,6 så att föroreningsbelastningen på MBR-processen inte ändrades
- Temperaturen på inkommande vatten sänktes med 3 °C från 17 °C till 14 °C



Figur 15. Simulering av scenario med högt flöde och sänkning av temperatur under tre dygn (skuggade areor). De tre plottarna visar resultat från ammonium-, syre- och luftflödesregulatorn. *Blåa linjer* – börvärden. *Gröna linjer* – processvärden. *Orangea linjer* – styrsignaler.

Processens svar och regulatorernas prestanda mot detta scenario visas i Figur 15. När flödet ökar och temperaturen sjunker stiger ammoniumkoncentrationen i processen. Ammoniumregulatorn skickar då ett högre syrebörvärde till syregulatorn och syrekoncentrationen ökar från ca 2,1 till 3,1 mg/l under de dagar högtflödesscenariot pågår. Detta gör att ökningen i ammoniumkoncentration kan begränsas. När högtflödet avstannat sjunker syrebörvärdet långsamt till normala värden under ca 10 dygn.

Med de parametervärden som valts för ammoniumregulatorn ($T_i = 2,4$ h och $K_P = -1,75$) fås en väldigt långsam regulator. Syftet med en sådan är att syrehalten bestäms så att ammoniumhalten som medelvärde hamnar nära börvärdet. Det skulle gå att snabba upp regulatorn men en konsekvens blir då kraftigare syrehaltsvariationer under dygnet.

Tidsspannet i Figur 15 är 21 dagar. För intrimning av regulatorer som påverkar långsamma processer på reningsverk, t.ex. ammoniumregulatorn, är det alltså inte praktiskt att använda en digital tvilling som inte går snabbare än fem gånger realtidshastighet. För dessa fall måste tvillingen kunna snabbas upp signifikant, alternativt kan intrimning ske "traditionellt" genom simulering utan koppling till verkligt styrsystem.

4.4 Diskussion

Den digitala tvillingen som utvecklats i detta projekt har två huvudsakliga nyttor relaterade till driftsättning av styrsystem: (1) operativ personal kan arbeta virtuellt i en miljö som är identisk med verkligheten och (2) programmeraren får verklighetstrogen processrespons.

- **Förenklat användande av komplicerade processmodeller:** Styrsystemet kan testas och utvärderas virtuellt utan att användaren behöver se den bakomliggande processmodellen. Historiskt har det visat sig att befintliga processmodeller i separat simuleringsmiljö främst används av processspecialister med relativt hög utbildningsnivå. Med den digitala tvillingen är det sannolikt att de mervärden en matematisk modell har i högre grad kan utnyttjas i och med att den körs med ett för användaren välbekant gränssnitt.
- **Realistisk operatörsträning och intrimning:** Med gränssnittet kan t.ex. operativ personal utbildas i både styrsystemets funktionalitet och processens beteende. Detta möjliggör sannolikt att fler slutanvändare av styrsystemet kan vara med och felsöka, verifiera och optimera styrsystemet innan driftsättningen. Eftersom processmodellen inte är en exakt kopia av verkligheten blir optimeringen preliminär och den kan behöva uppdateras när den verkliga processen körs. Det är dock sannolikt en fördel att dels ha bra startvärden inför driftsättningen dels kunna träna och testa optimeringsmetodiken i förväg.
- **Snabbare utvärdering av driftändringar utan risk att störa den verkliga processen:** I en online-situation, där den digitala tvillingen körs parallellt med verkligheten möjliggör den digitala tvillingen att operatören kan testa en ny driftinställning virtuellt. Fördelen är att man då inte riskerar att störa den verkliga processen samt att resultatet av ändringen kan fås fem gånger snabbare än i verkligheten. Nackdelen, jämfört med att göra testet i verkligheten, är att den resulterande processresponsen inte är exakt i och med att modellen är en approximation av verkligheten.
- **Effektivare och säkrare test av programmerad styrning:** För programmeraren och styrsystemutvecklaren är den stora fördelen att ett nytt eller modifierat styrsystem kan utvärderas med verklighetstrogen processrespons. Detta kan jämföras med ett mer traditionellt förfarande där utvecklaren manuellt måste ansätta värden på mätsignaler för sina tester. Genom att köra den digitala tvillingen en tidsperiod, t.ex. ett dygn, kan man med tvillingen bekräfta att signalkopplingar är riktiga och att valda parametervärden såsom regulatorparametrar inklusive min- och maxgränser är realistiska.

4.5 Framtida arbete

För att vidare kunna utreda hur användbar den digitala tvillingen är vid driftsättning av styrsystem behöver:

- **Tillgängligheten utökas.** Under genomförandet har endast en användare kunnat arbeta med applikationen. Vid en fortsättning bör denna implementeras så att fler tänkbara användare (programmerare, automations-, drift- och processingenjörer) enkelt kan komma åt verktyget. För att detta skall bli möjligt behöver upplägg kring licenser av ingående mjukvaror tas i åtanke vilket även gäller IT-säkerheten i den organisation där den digitala tvillingen implementeras.
- **Ett större och verkligt styrsystem testas.** För att vidare utvärdera den praktiska nyttan med applikationen behöver ett större och verkligt styrsystem testas. Inom detta projekt har försök med att inkludera ett stort verkligt styrsystemprojekt i den digitala tvillingen gjorts. De preliminära resultaten är att detta är relativt enkelt. Som nämnts i Avsnitt 2.2.1 finns i modellen för MBR-processen flera reglerbara variabler, t.ex. kemflödes- och recirkulationspumpar, klara att kopplas in. Ett lämpligt framtida projekt är att inkludera det nya styrsystemet för MBR-processen i den digitala tvillingen.
- **Simulering av olika scenarion och dokumentering automatiseras.** Dagens metodik för att testa styrsystem, FAT, är tidskrävande och begränsas av att den verkliga processresponsen inte utvärderas. Det finns därför goda ekonomiska och processsäkerhetsmässiga skäl för att automatisera FAT-tester med en digital tvilling. I den utvecklade applikationen är det enkelt att automatisera standardscenarion såsom avprovning av signalförändringar och reglerkretsar. För den specifika tillämpningen reningsverk kan man även fastställa vilka reglerkrav en krets ska uppfylla. Exempelvis kan ett scenario som innebär integratordrivning inkluderas för att säkerställa att antiwindup fungerar. I ett virtuellt FAT test (eller VAT test) blir dessutom dokumentation av resultaten transparent om även detta automatiseras.

I punkterna ovan har listats några aktiviteter som är relevanta för fortsatt utvärdering av den i projektet framtagna applikationen. För att öka nyttan och användningsområdena för den digitala tvillingen ytterligare behövs:

- **Kalibrering av processmodellen.** Genom att köra den digitala tvillingen parallellt med den verkliga processen kan modellen kalibreras varefter regulatorernas parametervärden kan trimmas in mer noggrant. Med en kalibrerad modell får den digitala tvillingen också fler användningsmöjligheter. Genom att driva modellen med verkliga indata i realtid kan den t.ex. användas för avvikelsetektion.
- En undersökning kring möjligheten att **accelerera körningen av styrsystemet** ytterligare. I den här presenterade tekniska lösningen finns möjlighet att snabba upp förloppen med upp till fem gånger realtid. Många processer på reningsverk är långsamma med svarstider på dagar och till och med veckor. För att kunna analysera dessa förlopp med den digitala tvillingen behöver den kunna köras ännu snabbare.

5 Slutsatser

En digital tvilling finns nu implementerad på en dator inom Stockholm Vatten och Avfalls nätverk. Den kan köras upp till fem gånger snabbare än realtid utan kända problem och följande slutsatser kan dras:

- Det är tekniskt möjligt att skapa en digital tvilling bestående av verklig styrsystemskod och en dynamisk processmodell.
- Den digitala tvillingen kan användas för att:
 - Upptäcka fel i styrsystemet
 - Ta fram realistiska startvärden på regulatorer
 - Säkerställa önskad funktion från styrsystemet vid kritiska driftfall, till exempel att anti-windup fungerar tillfredsställande
- Det simulerade styrsystemet är identiskt med det verkliga vilket gör den digitala tvillingen realistisk och väl lämpad för operatörsträning

Ytterligare försök krävs för att utförligare undersöka nyttan med en digital tvilling vid avprovning av styrsystem.

6 Referenser

Carlsson, B. och Hallin, S. (2010). *Tillämpad reglerteknik och mikrobiologi i kommunala reningsverk*. Svenskt Vatten Publikation U5.

Carlsson, H., Haraldsson, M., Kärrman, E., Lidström, V., Lundh, M., Malm, A., Malmström, H., Pendrill, L., Rönnbäck, M., Sjögren, L. och Svensson, G. (2017). *Investeringsbehov och framtida kostnader för kommunalt vatten och avlopp*. Rapport, Svenskt Vatten AB, Stockholm, Sverige.

Gernaey, K.V., Jeppsson, U., Vanrolleghem, P.A. och Copp, J.B. (2014). *Benchmarking of Control Strategies for Wastewater Treatment Plants*. IWA Scientific and Technical Report No. 23, ISBN 9781843391463, IWA Publishing, London, UK.

Henze, M., Gujer, W., Mino, T. och van Loosdrecht, M. C. M. (2000). *Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3*. IWA Scientific and Technical Report No. 9, IWA Publishing, London, UK.

Lindblom, E., Jeppsson, U. och Sin, G. (2020). Identification of behavioral model input data sets for WWTP uncertainty analysis. *Water Science and Technology*, **81**(8).

Åmand, L., Andersson, S., Arnell, M., Oliveira, F., Rahmberg, M. och Junestedt, C. (2016). *Nya utsläppskrav från svenska reningsverk – effekter på reningsverkens totala miljöpåverkan*. IVL Svenska Miljöinstitutet, Rapport B2246 samt SVU Rapport 2016-12 rev.

Åmand, L. (2015). *Implementering och utvärdering av ammoniumåterkoppling i fullskala*. IVL Svenska Miljöinstitutet, Rapport B2200.

SIEMENS



IVL Svenska Miljöinstitutet AB // Box 210 60 // 100 31 Stockholm
Tel 010-788 65 00 // www.ivl.se