



UPPSALA
UNIVERSITET

UPTEC W 17 019

Examensarbete 30 hp
September 2017

Optimering av blåsmaskinstyrning på Bromma reningsverk

Moa Wikén

REFERAT

Optimering av blåsmaskinstyrning på Bromma reningsverk

Moa Wikén

Luftningssteget är den mest energikrävande processen i ett avloppsreningsverk. Det finns därför incitament till att effektivisera energianvändningen då en minskad elförbrukning är positivt både ur ett ekonomiskt perspektiv och ur ett resursmässigt perspektiv. Energibesparingar från luftningssteget har undersökts tidigare genom att främst studera optimering av syrerregleringen och luftregulatorn. Det här projektet syftar till att uppnå en minskad effektförbrukning på Bromma reningsverk genom att optimera blåsmaskinsregulatorn, ett mer utforskat forskningsfält.

På Bromma reningsverk installerades den 16 december 2016 tre nya blåsmaskiner som ska försörja luftningssteget i den biologiska reningen med luft. Det innebär att det finns två olika typer av blåsmaskiner som är i drift på Bromma: den gamla modellen (HST9000) och den nya modellen (HST40). Då dessa två olika typer av blåsmaskiner har olika kapacitet och verkningsgrad är det viktigt att blåsmaskinsregulatorn använder en styrstrategi som ställer dessa maskiner i kö på ett optimalt energieffektivt sätt. Det är även viktigt att i så stor utsträckning som möjligt låta maskinerna generera luftflöden nära sin högsta verkningsgrad.

Driftinformation för blåsmaskinerna användes för att med hjälp av beräkningar i MATLAB kunna välja ut det effektivaste antalet maskiner i drift, avgöra vilken typ av maskiner som ska användas samt vilket luftflöde respektive maskin ska generera vid ett specifikt luftflödesbehov. Målet var att hitta en optimal styrstrategi för Bromma reningsverk, samt att undersöka om det fanns möjligheter till energibesparingar jämfört med nuvarande implementerade styrstrategi. Effektförbrukningsberäkningar gjordes för både den simulerade optimerade styrstrategin och den nuvarande. Ytterligare en styrstrategi, föreslagen av blåsmaskinsleverantören Sulzer, undersöktes också ur ett energiförbrukningsperspektiv för jämförelse.

Resultatet av simuleringen och effektberäkningen indikerar att den nuvarande styrningen i princip är lika energieffektiv som den simulerade optimala styrningen. I båda fallen kopplas de nya maskinerna in i första hand. Dock visar resultatet på att den simulerade styrningen är effektivare vid flöden där det krävs att de gamla blåsmaskinerna sätts i drift. Sulzers föreslagna styrstrategi är mer energieffektiv än nuvarande styrning, men inte lika effektiv som den optimerade styrstrategin.

Nyckelord: Blåsmaskiner, reglerteknik, optimering, effektberäkningar, minsta kvadratmetoden, luftning, blåsmaskinsregulator, Bromma, reningsverk, avloppsvattenrening

Institutionen för informationsteknologi, Uppsala universitet,

Box 337, SE-751 05 Uppsala, Sverige

ISSN 1401-5765

ABSTRACT

Optimization of blower control at Bromma wastewater treatment plant

Moa Wikén

The aeration step is the most energy consuming process in the wastewater treatment plant, i.e. making the energy usage in this step more efficient is of great concern both in Sweden and world wide. There are some examples of previous studies investigating ways to make the aeration control more efficient, though most of these have focused on for example ammonium feedback control rather than blower control which is the main focus of this study.

Bromma wastewater treatment plant installed three new blowers in december 2016 functioning as suppliers of air to the aeration step in the bioreactor. Since there are still three old blowers operating at the WWTP, there is a need to control two different types of blowers efficiently. This is challenging since the two blower types have different capacities, efficiency and maximum/minimum air flows and a control strategy that optimizes the operation of these two blower types combined needs to take this into account.

Operational data for the blowers was used to generate a second grade polynome for each blower type which gives the efficiency as a function of produced air flow. These polynomes were further utilized to build a script in MATLAB that chooses the most efficient number of blowers operating and at what air flows for a certain total aeration need. The least square method was used to calibrate a model for calculating energy consumption for the simulated control strategy. Calculations for energy consumption from the current control strategy and another strategy proposed by the blower deliverer Sulzer were made in order to decide whether the optimized control strategy was an improvement or not.

The simulation results and the calculations for energy consumption indicates that the current control strategy at Bromma WWTP is almost as effective as the optimized control strategy.

Both strategies sets the new blowers at the first places in the queue. The optimized strategy appears to be more efficient for flows that requires both new and old blowers operating. From the calculations of energy consumption, it was shown that the control strategy from Sulzer demands an energy consumption on levels in between the one for the current control strategy and the optimized control strategy.

Keywords: blowers, automatic control, optimization, efficiency, least square method, aeration, blower control, Bromma, wastewater treatment plant, wastewater treatment

Department of Information Technology, Uppsala University,

Box 337, SE-751 05 Uppsala, Sweden

ISSN 1401-5765

FÖRORD

Med detta examensarbete avslutar jag mina studier på civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik på Uppsala universitet och Sveriges lantbruksuniversitet. Arbetet omfattar 30 högskolepoäng och har gjorts i samarbete med Stockholm Vatten och Avfall under handledning av Dan Fujii och Erik Lindblom. Ämnesgranskare har varit Bengt Carlsson vid institutionen för informationsteknologi.

Först och främst vill jag tacka Stockholm Vatten och Avfall för en intressant uppgift och frågeställning, samt för att jag fick möjligheten att göra mitt examensarbete hos er. Ett särskilt tack vill jag rikta till mina handledare Dan och Erik som gett mig värdefulla tips och råd samt varit ett viktigt stöd för att kunna föra arbetet framåt. Tack till ämnesgranskare Bengt för intressanta diskussioner och hjälp med rapportskrivningen. Tack till Ove Sigfridsson på Stockholm Vatten och Avfall som tog sig tid att introducera mig till styrningen av luftningsprocessen på Bromma reningsverk. Tack till Per Carlsson på Stockholm Vatten och Avfall som tog sig tid till att försöka förklara styrscheman för blåsmaskinsregulatorn på Bromma. Sist men inte minst vill jag tacka mina vänner och kursare på civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik som gett mig stöd och uppmuntran i stunder då examensarbetet känts tungt och svårt.

Moa Wikén

Uppsala, september 2017

Copyright © Moa Wikén och Institutionen för informationsteknologi, Uppsala universitet. UPTEC W 17 019, ISSN 1401-5765 Publicerad digitalt vid Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet, Uppsala, 2017.

POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING

Reningen av avloppsvatten är en viktig funktion för att hantera det avfall som samhället gemensamt ger upphov till. Orenat avloppsvatten innehåller bland annat kväve, fosfor och olika patogener. Utsläpp av kväve och fosfor bidrar till övergödning vilket innebär risk för igenväxt av sjöar och vattendrag, syrebrist och bottendöd, negativ påverkan på biologisk mångfald med mera. Patogener renas för att minimera sjukdomsspridning från avloppsvattnet.

Ett avloppsreningsverk är oftast uppdelat i tre huvudsakliga reningssteg: mekanisk, biologisk och kemisk rening. Det är i det biologiska reningssteget kvävereningen sker, och för att möjliggöra detta krävs att en del av kvävereningsprocessen luftas för att skapa de syrerika förhållanden som de kväverenande mikroorganismerna kräver för att kunna genomföra reningen. Luftningen är den mest energikrävande delen av avloppsreningsverket och står för mellan 50 - 80 % av den totala energiförbrukningen.

För att tillgodose mikroorganismernas syrebehov används blåsmaskiner för att mekaniskt skapa lufttillförsel till luftningsbassängerna. Det här examensarbetet har fokuserat på styrningen på dessa blåsmaskiner och hur styrningen kan optimeras för att minska energiåtgången på Bromma reningsverk.

Detta har gjorts givet att det funnits två olika blåsmaskintyper installerade med olika luftningskapacitet och verkningsgrad. Utmaningen var att ta fram en styrstrategi som ställer upp en kördning där de olika maskintyperna sätts i drift i en ordning och vid de luftflödesbehov så att effektiviteten maximeras. Dessutom har nuvarande styrning undersökts eftersom det inte är känt exakt hur nuvarande styrning ser ut i dagsläget.

Framtagandet av en optimal styrstrategi för blåsmaskinerna på Bromma reningsverk gjordes utifrån driftkurvor för respektive blåsmaskintyp. Driftkurvorna innehöll information om vilken verkningsgrad respektive blåsmaskinstyp har vid specifika luftflöden och mottryck. Datapunkter från driftkurvorna samlades in och utifrån dessa togs polynom fram, med hjälp av minsta kvadratmetoden som angav verkningsgraden som funktion av luftflödet. Med hjälp av dessa polynom beräknades effektiviteten för olika möjliga kombinationer av antal blåsmaskiner och luftflödesproduktion per maskin för att uppnå ett spann av olika totala luftflödesbehov. För varje totala luftflödesbehov väljs den mest effektiva kombinationen ut. När detta gjorts för varje totalluftflöde blir vektorn med de effektivaste

kombinationerna för varje totalflöde den optimala styrstrategin för blåsmaskinerna.

För att kunna jämföra nuvarande styrstrategi med den teoretiskt beräknade optimala styrstrategin ur energisynpunkt, togs en effektförbrukningsmodell fram som byggde på antagandet att den modellerade effektförbrukningen för en viss blåsmaskin är proportionell mot luftflödet genom verkningsgraden. Nuvarande styrning undersöktes genom att granska styrritningar och analysera driftdata.

Utifrån driftdata och styrritningar framkom i princip ingen ny information om nuvarande styrning. Resultatet för den optimerade styrstrategin var att det är effektivast att fördela luftflödesproduktionen jämnt mellan blåsmaskiner av samma typ. Det är även effektivast att låta de nya maskinerna sättas i drift först samt uppnå nära sin maximala luftflödesproduktion innan de gamla maskinerna sätts i drift. För Bromma reningsverk kommer det inte vara aktuellt att ha fler än fem blåsmaskiner i drift samtidigt eftersom maxkapaciteten för totalt luftflöde annars överskrids. Från effektförbrukningsberäkningarna för den optimala styrstrategin framkom att nuvarande styrning energimässigt är i princip lika effektiv som den optimerade styrningen för de flesta totala luftflöden. Dock finns det energibesparingsmöjligheter för höga flöden. Driftdata indikerar på att detta beror på att den nuvarande styrningen sätter den gamla typen av blåsmaskiner i drift för tidigt för att det ska vara energieffektivt.

Innehåll

1	INLEDNING	1
1.1	BAKGRUND	1
1.2	TIDIGARE STUDIER	1
1.3	MÅL OCH SYFTE	3
1.3.1	DELMÅL	3
1.3.2	FRÅGESTÄLLNINGAR	3
2	TEORI	4
2.1	RENINGSVERKETS FUNKTION	4
2.2	AKTIVSLAMPROCESSEN	5
2.3	LUFTNINGSSTEGET I ETT RENINGSVERK	6
2.3.1	BLÅSMASKINER	7
2.3.2	MOST-OPEN-VALVE (MOV)	9
2.4	BESKRIVNING AV BROMMA RENINGSVERK	10
2.4.1	BROMMA RENINGSVERK	10
2.4.2	NUVARANDE STYRSYSTEM	12
3	MATERIAL OCH METODER	14
3.1	DATA	14
3.1.1	LUFTFLÖDESMÄTNINGAR	14
3.1.2	UTVALD TIDSPERIOD	14
3.2	MODELLERING OCH BERÄKNINGSMETODER	14
3.2.1	ANTAGANDEN	15
3.2.2	RANDVILLKOR	15
3.2.3	MINSTA KVADRATMETODEN	15
3.2.4	POLYNOMANPASSNING	16
3.2.5	OPTIMERING AV STYRSTRATEGI	18
3.2.6	MODELLERING AV EFFEKTFÖRBRUKNING	18
4	RESULTAT	20
4.1	NUVARANDE STYRNING	20

4.1.1	STYRRITNINGAR	20
4.1.2	UTIFRÅN DRIFTDATA	20
4.2	OPTIMERING AV STYRSTRATEGI	21
4.3	JÄMFÖRELSE MELLAN NUVARANDE OCH OPTIMERAD STYRNING	25
5	DISKUSSION	26
5.1	STYRSTRATEGI	26
5.1.1	JÄMFÖRELSE MELLAN SULZERS STYRSTRATEGI OCH OPTIMERAD STYRSTRATEGI	26
5.1.2	NUVARANDE STYRNING	27
5.1.3	EFFEKTFÖRBRUKNING	28
5.2	VIDARE UNDERSÖKNINGAR	29
5.3	FELKÄLLOR	29
6	SLUTSATSER	30
7	REFERENSER	31
	APPENDIX A	33
	APPENDIX B	40
	APPENDIX C	50

1 INLEDNING

1.1 BAKGRUND

Reningsprocessen i ett avloppsreningsverk är uppdelad i flera steg varav ett är det biologiska reningssteget, där mikroorganismer används för att bryta ned organiskt material. Det är även i det biologiska reningssteget som den största delen av kvävereningen sker, vilket görs genom att kvävet bryts ned i två olika processer; nitrifikation och denitrifikation. Nitrifikationen är en aerob process som sker i luftningsbassänger där syrebehovet tillgodoses med hjälp av blåsmaskiner. Luftningen orsakar mellan 40 - 60 % av energiförbrukningen enligt Arnell (2016), mellan 50 - 80 % av ett avloppsreningsverks energiförbrukning enligt Olsson (2008) och mellan 45 - 75 % enligt Rosso et al. (2008). Luftningssteget står med andra ord för en betydande del av energiförbrukningen i reningsverket. Då luftningen är den mest energikrävande processen i ett reningsverk är implementering av en anpassad och optimerad styrstrategi för luftningen ett av de effektivaste sätten att minska energiförbrukning och därmed också driftskostnaderna för reningsverket (Alex et al., 2016).

Den 15 december 2016 installerades tre nya blåsmaskiner på Bromma reningsverk. De nya respektive gamla blåsmaskinerna har olika egenskaper vad gäller kapacitet och verkningsgrad. Då de nya maskinerna har högre verkningsgrad och kan generera större luftflöden är det önskvärt att dessa är i drift i första hand. Sigfridsson (2017a) menar dock på att styrsystemet måste se till att de gamla maskinerna inte står stilla under alltför lång tid då det finns ett behov att ”motionsköra” dessa. En förutsättning för att kunna ta fram ett förslag på optimal styrstrategi för blåsmaskinregulatorn på Bromma reningsverk är att utreda nuvarande styrning då detaljer kring hur delar av denna fungerar är okända.

1.2 TIDIGARE STUDIER

Energibesparingar inom reningsverk är något som ständigt undersöks och utvärderas. Det finns ett stort antal exempel på studier av syrerreglering och luftregulator. 2007 undersöktes olika styrstrategier på reningsverket för att minska energiåtgången (Thunberg, 2007). Ett annat exempel är Nordenborg (2011) som undersökt hur energiförbrukningen på Käppalaverket kan minimeras genom att ändra luftflödes-

styrningen. Där konstaterades att en reduktion av variationer i luftflödet minskade energiförbrukningen gav upphov till större instabilitet, medan ett konstant syreflöde gav en effektivare ammoniumreduktion och dessutom större energibesparingar.

Det finns en del forskning som undersökt hur blåsmaskiner kan effektiviseras genom att se över själva konstruktionen av dessa. Exempelvis i Jung et al. (2016) analyserades designparametrarna för diffusorerna i en turbo-blåsmaskin och villkor för optimal design av blåsmaskinen togs fram.

Mer allmänt om styrstrategier för blåsmaskiner beskrivs av Keskar (2005). Där redogörs för två olika huvudtyper av blåsmaskiner: kolvmaskiner och centrifugalmaskiner (se avsnitt 2.3.1 för utförligare beskrivning av olika typer av blåsmaskiner). För centrifugalmaskiner, som är den blåsmaskintyp som är mest lik de turbokompressorerna som används på Bromma reningsverk, nämns tre olika styrstrategier för det utgående luftflödet från blåsmaskinerna: (1) Strypning av flöde (eng: "discharge throttling"), (2) varvtalsreglering av blåsmaskinerna (blower speed) och (3) strypning av inloppet med en strypventil eller en inloppsflöjel (eng: inlet guide vane, IGV). Blåsmaskinerna på Bromma reningsverk är varvtalsreglerade, varför (2) är mest intressant. Förändring av blåsmaskinernas hastighet/varvtal inverkar luftflödesproduktionen och därmed även tryckförhållandena. Enligt Keskar (2005) finns potential för signifikanta energibesparingar i och med det samband som finns mellan varvtal och behov av hästkrafter för centrifugalmaskiner. Denna typ av blåsmaskiner tenderar även att förlora effektivitet vid lägre varvtal enligt Keskar (2005).

I Schraa et. al. (2017) simuleras ett luftningssystem bestående av tre likadana centrifugalblåsmaskiner som försörjer en manifold med luft. Modellen för luftningssystemet kan beräkna blåsmaskinernas effektivitet, och därmed görs en jämförelse för energiförbrukning för olika scenarier, varav ett av dessa innebär att blåsmaskinernas effektivitet är konstant. Fallet med konstant blåsmaskinseffektivitet är ett av de mest energisparande, men det konstateras även att energioptimering med varierande effektivitet för blåsmaskinerna också är möjligt.

1.3 MÅL OCH SYFTE

Projektet syftade till att optimera driften och regleringen av de sex blåsmaskinerna på Bromma reningsverk och därmed minska maskinernas energiförbrukning. Både en översikt över den befintliga styrningen samt förslag på hur den kan förbättras har tagits fram. Projektet fokuserade främst på utvecklingen av blåsmaskinregulatorn, emellertid har andra delar av reglerstrukturen så som luftregulatorn, trycket i luftledningen och ventilernas öppningsgrad också beaktats i studien. Målet med projektet var att ta fram ett förslag på styrstrategi så att blåsmaskinregulatorn på Bromma reningsverk efter avslutat projekt kontinuerligt skall kunna beräkna det ur energisynpunkt optimala antalet maskiner som är i drift vid olika luftflödesbehov.

1.3.1 DELMÅL

Projektet delades upp i ett antal delmål. Delmålen innefattade;

- utredning av dagens reglering av blåsmaskinerna på Bromma reningsverk
- framtagande och implementering av en optimeringsmodell utifrån aktuella driftdata
- framtagande av optimerad styrstrategi
- simulering av föreslagen optimerad styrning.

1.3.2 FRÅGESTÄLLNINGAR

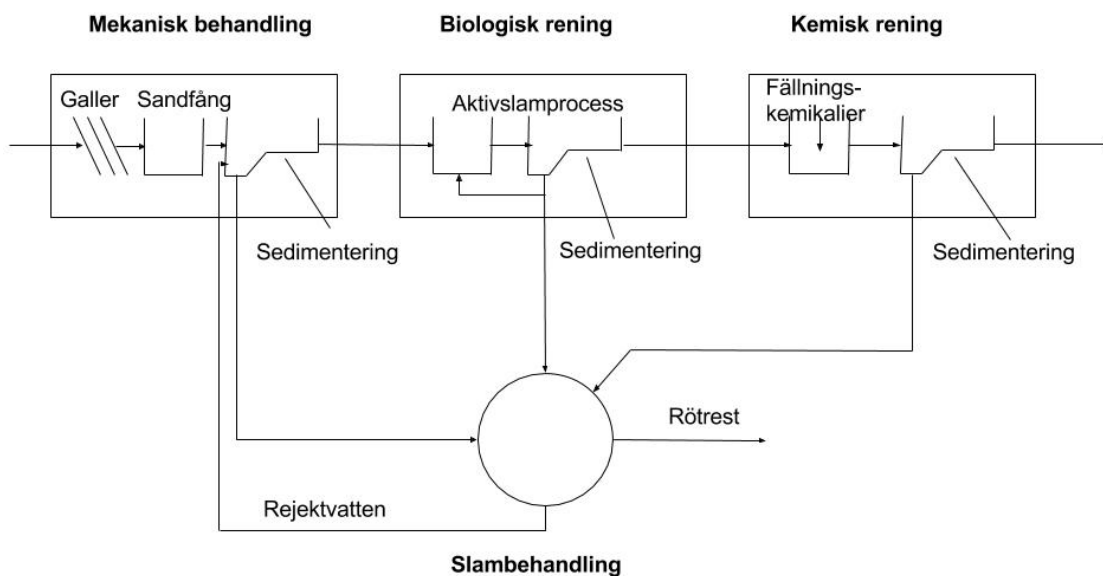
Följande frågeställningar låg till grund för projektet;

- hur ser dagens styrning av blåsmaskinerna på Bromma reningsverk ut?
- hur ska en algoritm som beräknar optimalt antal blåsmaskiner i drift se ut?
- varför ser den nuvarande styrningen ut som den gör?
- vilken styrning är optimal och varför?

2 TEORI

2.1 RENINGSVERKETS FUNKTION

Ett konventionellt reningsverk består av tre huvudsteg som delas upp i mekanisk, biologisk och kemisk rening. Samtliga reningssteg efterföljs av ett sedimenteringssteg och det resulterande slammet behandlas genom bland annat avvattning (Svenskt vatten, 2013). Figur 2.1 visar översiktligt reningsprocessen.

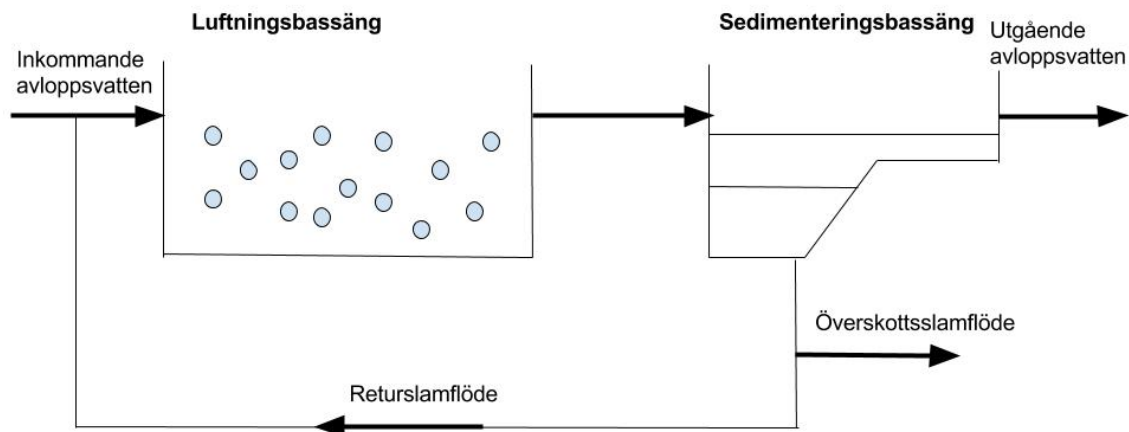


Figur 2.1. Schematisk figur över reningsprocessen i ett konventionellt reningsverk.

Det inkommande avloppsvattnet består av komponenter som gör att alla tre olika typer av reningssteg krävs för att avlägsna miljöskadliga ämnen i det utgående, behandlade vattnet. Huvudfokus för avloppsreningsprocessen är att avlägsna kväve, fosfor, patogener och organiskt material i syfte att undvika övergödning, miljöförstörelse och spridning av smittor (Åmand, 2014).

2.2 AKTIVSLAMPROCESSEN

Aktivslamprocessen (ASP) togs fram och utvecklades runt år 1912-1914. Då gjordes upptäckten att oxidationsprocessen accelererades kraftigt om mekanisk tillförsel av luft kombinerades med recirkulation av biomassa (Jenkins & Wanner, 2014). Även om designen varierar mellan olika avloppsvattenreningsverk finns det tre komponenter som i regel förekommer i ASP: en luftningsbassäng, en sedimenteringsbassäng samt returslam som recirkuleras enligt figur 2.2.



Figur 2.2. Schematisk figur över aktivslamprocessen.

Luftningsbassängen agerar som en bioreaktor och innehåller de mikroorganismer som används för nedbrytning av organiskt material. Luft från atmosfären blandas med mekaniskt renat avloppsvatten kombinerat med mikroorganismerna för att bilda den biologiska flock som är mer känd som aktivt slam (IWA, n.d.). Biologiska flockar bildas med hjälp av dels slemproducerande bakterier som bidrar till att flockarna kan hålla ihop och dels filamentbildande bakterier som ger flockarna stadga och stabilitet (Hallin, 2015). Aktivslamprocessen kan delas upp i ett antal huvudsakliga funktioner: suspension av

mikroorganismer, oxidation av både löst och partikulärt organiskt material, avskiljning mellan vätskor och fasta ämnen för att minska totalhalten suspenderat material i det behandlade avloppsvattnet samt bortförande av överflödigt slam för att bibehålla önskad massa (Wanner & Jenkins, 2014).

ASP är i grunden en relativt simpel process. I en kontrollerad miljö imiterar ASP en naturlig process som sker när biologiskt material assimileras. Mikroorganismerna i det aktiva slammet tar upp näringsämnen, organiskt material och syre som är löst i avloppsvattnet och använder detta till sin egen tillväxt och reproduktion. Det organiska materialet används som kol- och energikälla för mikroorganismerna (Jenkins, 2013). Aktivslamprocessen är betydande för kvävereningen av avloppsvattnet. Det biologiska reningssteget kan vara uppbyggt på olika sätt, exempelvis genom ett luftat nitrifikationssteg som efterföljs av ett anoxiskt denitrifikationssteg. Nitrifikationssteget kan även föregås av en fördenitrifikation.

Recirkulationen av slam är nödvändigt då de mikroorganismer som genomför nitrifikationssteget har en långsam tillväxt. Detta innebär att om inte recirkulation sker och slammet har en för kort uppehållstid (även kallad slamålder) i biosteget spolas mikroorganismerna ut ur processen innan de hunnit genomföra reningen (Åmand, 2014).

2.3 LUFTNINGSTEGET I ETT RENINGSVERK

Luftningen i reningsverket görs för att möjliggöra de aeroba processerna i det biologiska reningssteget så som exempelvis aktivslamprocessen, biologisk filtrering och aerob nedbrytning. Dessa processer är beroende av att det finns en tillräcklig mängd löst syre (eng: dissolved oxygen, DO) tillgängligt (Metcalf & Eddy, 2014). Eftersom DO-koncentrationen är avgörande för att uppnå en lämplig miljö i den aeroba delen av det biologiska reningssteget är det även en viktig parameter att reglera. Luftningssystemet är i regel designat för att tillgodose syrebehovet i aktivslamprocessen. Enligt Caivano et. al. (2017) bör optimal syretillförsel vara periodiskt reglerad, vilket även är fallet på Bromma reningsverk där luftningen sker intermittent.

Syretransporten är mer effektiv när luftningsbassängerna luftas med små bubblor då grövre bubblor orsakar större turbulens och därmed ger grovblåsiga diffusorer en lägre syreöverföringseffektivitet (Arnell, 2016; Åmand, 2013). Syre löser sig dessutom dåligt i vatten och det är en låg syreöverföringstakt mellan ytvattnet och atmosfären (Metcalf & Eddy, 2014). Detta innebär att det krävs åtgärder för att

underlätta att syret löser sig i vattnet. Antingen genom att tillföra luft/syre till bassängerna eller genom att exponera mindre vattendroppar för atmosfären. Ett sätt att öka syretransporten är att öka antalet kontaktytor mellan vatten och luft. Detta kan göras genom att mekaniskt öka undervattensdiffusionen eller genom att tillföra rena syrebubblor till vattnet, eller genom att tillföra mindre luftbubblor (Metcalf & Eddy, 2014). I Åmand (2013) kategoriseras olika luftare i aktivslambassänger i tre olika kategorier: finblåsiga diffusorer, grovblåsiga diffusorer och övrig typ av utrustning. I den sistnämnda kategorin ingår exempelvis så kallade jetluftare. Som namnen antyder ger finblåsiga diffusorer upphov till mindre luftbubblor (och därmed större antal kontaktytor mellan vatten och luft) medan grovblåsiga diffusorer ger upphov till större luftbubblor.

Val och design av luftningssystem är avgörande för implementeringen av aktivslamprocessen i reningsverket. Luftningssystemet måste vara kapabelt att tillgodose syrebehovet vid den biologiska oxidationen av organiskt material i avloppsvattnet, tillgodose syrebehovet för respiration i biomassa, möta syrebehovet för biologisk nitrifikation, upprätthålla tillräcklig omblandning i bassängerna med mera (Metcalf & Eddy, 2014).

2.3.1 BLÅSMASKINER

Blåsmaskiner används för att tillgodose den aeroba processen med syre i det biologiska reningssteget i reningsverket. De är dessutom det första steget i luftningsprocessen av typen bottenluftning (Åmand, 2013). Blåsmaskiner konverterar mekanisk energi till energi i form av tryck. Omvandlingen sker genom interaktioner mellan luftflödet och en impeller som roterar. En impeller är ett roterande hjul som används för att förflytta en gas eller vätska, i det här fallet luft (Jung et al., 2016).

Både Arnell (2016) och Åmand (2014) tar upp att det finns två huvudtyper av blåsmaskiner: centrifugalmaskiner (eng: centrifugal blowers) och kolvmaskiner (eng: positive displacement blowers). Arévalo (2016) nämner även turbomaskiner som en huvudtyp, vilken är en sorts centrifugalmaskin enligt Åmand (2014) men som i vanliga fall betraktas som en egen kategori av blåsmaskiner enligt Fujii (2017d).

Regleringen för dessa olika typer av blåsmaskiner skiljer sig åt. Centrifugalmaskiner kan styras genom att variera kapaciteten hos blåsmaskinen för att luftflödet ska hållas på ett konstant börvärde (Åmand,

2014). Enligt Arnell (2016) finns det två huvudsakliga skillnader med avseende på styrningen mellan turbomaskiner och kolvmaskiner. Kolvmaskiner ger upphov till ett konstant luftflöde oberoende av trycket och beror främst av blåsmaskinens varvtal medan turbokompressorerna i stor utsträckning är beroende av

mottrycket. Mottrycket är ett tryck som består av framförallt trycket från vattenpelaren i bassängerna, men även exempelvis tryckförluster längs rör och ventiler med mera. Utöver detta skiljer sig blåsmaskinerna sig åt med avseende på effektivitet, alternativ för styrstrategi, responstid m.m. (Arnell, 2016; Åmand, 2014).

I reningsverk krävs att blåsmaskinerna kan generera ett stort spann av olika luftflöden inom ett litet mottrycksintervall under varierande villkor. En blåsmaskin kan oftast bara uppfylla en särskild uppsättning villkor effektivt. Eftersom det är nödvändigt att kunna uppfylla och möta ett brett spann av luftflöden på ett reningsverk krävs att möjlighet till att reglera eller stänga ner blåsmaskinerna inkluderas i systemdesignen. Sedan det blivit större betoning på energieffektivitet har turbokompressorerna börjat användas i reningsverk. Turbokompressorerna kan arbeta effektivare över ett större spann av olika driftvillkor jämfört med annan blåsmaskinsteknik (Metcalf & Eddy, 2014). Bromma reningsverk använder sig av blåsmaskiner av typen turbokompressorerna (eng: "turbo type blowers") (Fujii, 2017a). I figur 2.3 nedan visas en blåsmaskin av nyare modell (HST40) på Bromma reningsverk.



Figur 2.3. Blåsmaskin av typ HST40 på Bromma reningsverk. Foto: Erik Lindblom, 2017.

2.3.2 MOST-OPEN-VALVE (MOV)

Luften från blåsmaskinerna passerar en ventil innan den diffuseras ut i avloppsvattnet. Det finns olika typer av ventiler där dynamiken och flödeskaraktistiken varierar mellan de olika varianterna. Några exempel på olika typer av ventiler är vridspjällsventil, kägventil och kikventil. I de fall då den ventil som används är olinjär, och en liten förändring i öppningsgrad ger en liten förändring i luftflödet, brukar en maxgräns sättas upp för ventilens öppningsgrad. Givet att syftet är att hålla ett konstant tryck i manifoldern designas blåsmaskinstyrningen så att utflödet från blåsmaskinerna justeras för att kompensera för tryckförändringar en öppnad ventil skulle ge upphov till (Åmand, 2014).

Ett annat sätt att reglera trycket i systemet är med Most-Open-Valve-teknik (MOV). MOV är en styrstrategi som har till syfte att minimera de tryckförluster som uppstår i reningsverkets luftningssystem. Dessa förluster uppstår på grund av ett högt tryck i ledningarna, vilket kan motverkas med mer öppna

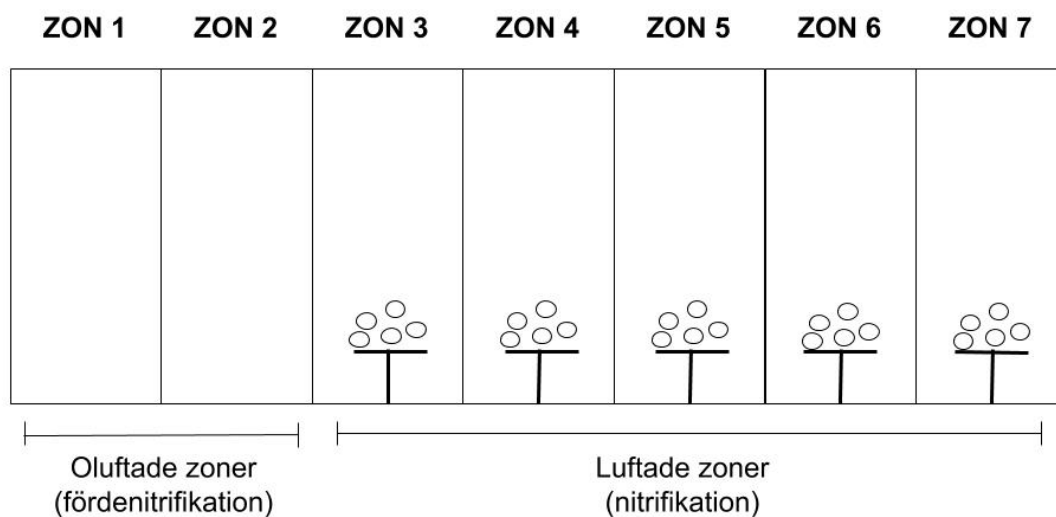
ventiler. MOV varierar trycket i ledningarna så att den ventil i systemet som kommer vara mest öppen i princip kommer vara helt öppen. Emellertid kräver denna styrstrategi att blåsmaskinen kan arbeta effektivt vid olika arbetstryck i manifoldern (Åmand, 2014).

2.4 BESKRIVNING AV BROMMA RENINGSVERK

2.4.1 BROMMA RENINGSVERK

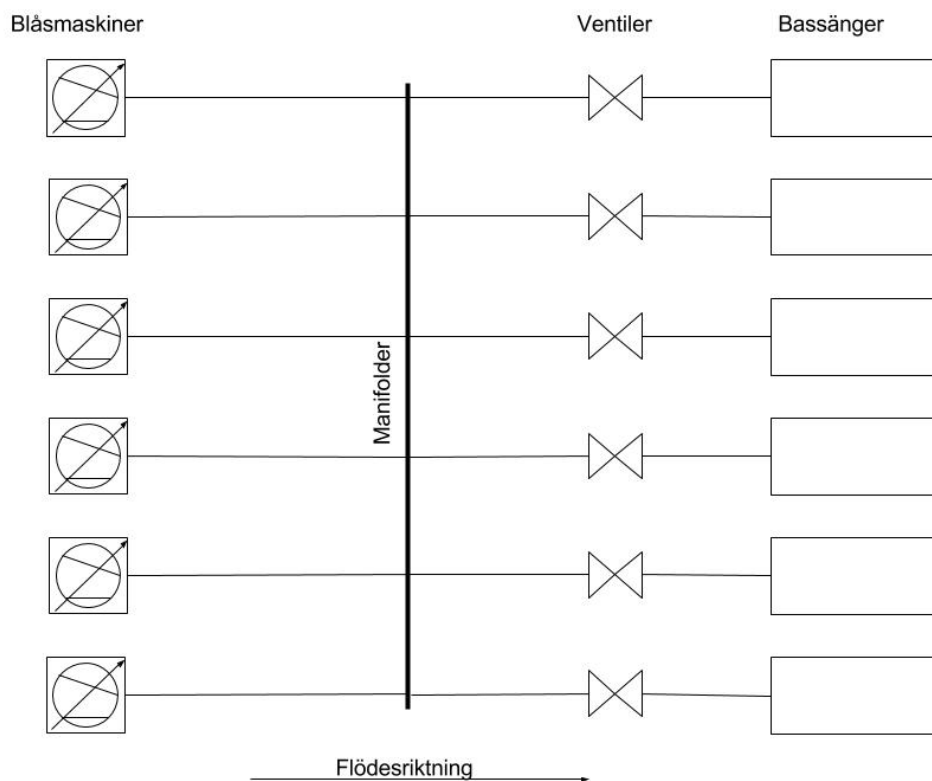
Bromma reningsverk är uppdelad i två anläggningar; Nockeby och Åkeshov. Anläggningarna är sammankopplade med en ca 600 m lång tunnel under jord. Bromma reningsverk renar ca 126 000 m³ varje dygn (Stockholm vatten, n.d.).

I Nockebyanläggningen sker den biologiska reningen (Stockholm vatten, n.d.). Denna består av 6 separata, parallella linjer som var och en består av 7 stycken olika zoner. Zon 3 till 7 är luftade zoner där nitrifikation sker (se figur 2.4). Luftningen i zon 3 styrs vintertid intermittent medan resterande zoner får kontinuerlig tillförsel av syre. Från zon 7 sker en ammoniumrecirkulation. DO-börvärdet i zon 3 bestäms utifrån nitratkoncentrationen i zon 7. Detta börvärde avgör i sin tur vilken luftning som krävs, och därmed vilken effekt som krävs av blåsmaskinerna enligt Lindblom (2017b). Zonuppdelningen på Bromma reningsverk möjliggör så kallad zonreglering av syrehalten. Detta är viktigt eftersom det möjliggör att anpassa luftningen efter syrebehovet som kan variera längs hela bassängen samt med vattentemperaturen. Det är också ett sätt att öka energieffektiviteten (Åmand, 2013).



Figur 2.4. Schematisk figur över zonindelningen i det biologiska reningssteget.

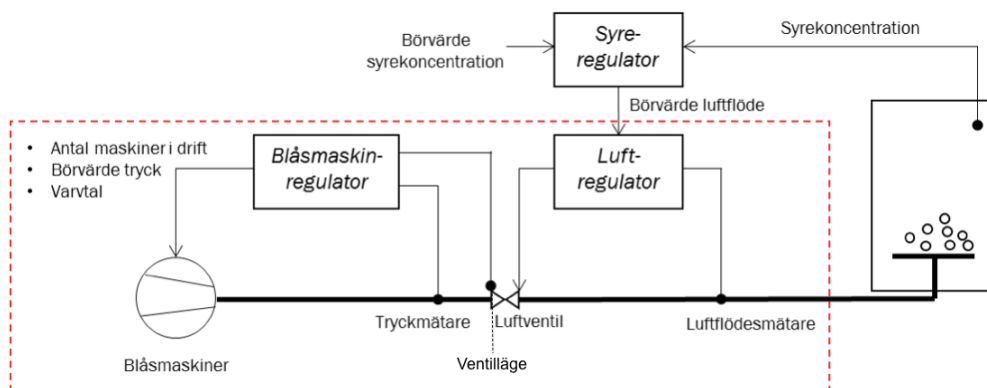
Till samtliga så kallade linjer i Nockebyanläggningen är det ett enda rör, en manifold, som tillför luften. Detta innebär att lufttrycket i manifoldern måste vara sådant att det är möjligt att reglera luftflödena med ventilerna så att dessa blir lämpliga för respektive linje. Detta kan vara utmanande eftersom varje linje fungerar olika och har olika behov. Detta gör också att implementering av MOV-styrning skulle kunna bli problematiskt då ventilerna för vissa linjer i princip är helt öppna medan ventiler för andra linjer är nästan helt stängda för samma lufttryck från manifoldern (Lindblom, 2017b). En schematisk bild över blåsmaskiner, ventiler och bassänger/linjer visas i figur 2.5 nedan.



Figur 2.5. Schematisk figur över luftens väg från blåsmaskin till luftningsbassäng på Bromma reningsverk.

2.4.2 NUVARANDE STYRSYSTEM

Givet vid början av detta projekt var att blåsmaskinerna är varvtalsreglerade, det vill säga att styrsignal och börvärde baseras på blåsmaskinernas varvtal, och att styrningen av syrehalten sker med hjälp av en syreregulator, luftregulator samt blåsmaskinregulator. Projektet har dock avgränsats till att betrakta den i figur 2.6 rödmarkerade delen av reglerstrukturen med särskilt fokus på blåsmaskinregulatorn.



Figur 2.6. Reglerstrukturen för styrning av syrehalt i den biologiska reningsprocessen på Bromma reningsverk. Figuren är framtagen av Erik Lindblom och modifierad av författaren.

Genom luftflödesmätningar reglerar luftregulatorn öppningsgraden för luftventilerna. Öppningsgraden för ventilerna mäts i intervallet 0 - 100 % och skickas vidare till blåsmaskinsregulatorn. Dock används inte signalen från ventil till blåsmaskinsregulator i nuvarande styrning vilket skulle vara fallet om automatisk MOV-styrning tillämpades (Lindblom, 2017c). Tryckmätare i manifoldern skickar mätvärden till blåsmaskinregulatorn. Utifrån dessa mätvärden beräknas en styrsignal som skickas till blåsmaskinerna. Denna styrsignal anger hur många maskiner som ska vara i drift samt hur stora luftflöden dessa maskiner ska producera. Vad styrsignalen är (om det är varvtal, effekt etc.) är okänt i dagsläget. Det är även okänt hur denna styrsignal räknas ut av regulatorn.

Kösystemet för nuvarande styrning sätter de nya maskinerna först i kön och därefter de gamla maskinerna. Inställningarna för kösystemet görs manuellt. De nya maskinerna HST40 har bäst verkningsgrad vid flöden mellan 7000 och 14000 Nm³/h. Verkningsgraden ligger då mellan 75 - 78 %. För de gamla maskinerna HST9000 är verkningsgraden bäst (ca 70 %) på flöden mellan 5000 - 6000 Nm³/h. Stockholm vatten och avfall har fått en rekommenderad styrstrategi från Sulzer, som dock är oklart om den har implementerats (se Appendix A). Sulzers rekommendation till styrstrategi innebär att blåsmaskinerna av respektive typ så ofta som möjligt ska generera flöden inom de flödesintervall för vilka de har högst verkningsgrad. De rekommenderar även att varje typ av blåsmaskin producerar lika stora luftflöden.

3 MATERIAL OCH METODER

3.1 DATA

Data som använts för beräkningar kommer från Stockholm Vatten och Avfalls egna mätningar och har hämtats via det interna programmet WASTE aCurve.

3.1.1 LUFTFLÖDESMÄTNINGAR

Luftflödesdata saknas för de gamla blåsmaskinerna, där antas luftflödet vara lika med styrsignalen från blåsmaskinsregulatorn multiplicerat med det maximala luftflödet som kan genereras av en blåsmaskin, Q_{max} . Det finns även luftflödesmätningar i luftningsbassängerna, men de uppmätta luftflödena från dessa mätningar kan inte korreleras till blåsmaskinernas effektuttag då det inte finns en mätare per bassäng utan en mätare per luftad zon. Luftflödesdata från blåsmaskin är visserligen beräknad men den utgår från fysikaliska egenskaper, så som exempelvis tryck och temperatur, och är specifik för varje ny blåsmaskin (Fujii, 2017c). Lindblom (2017a) bedömer att det går att anta att luftflödesdata från de nya blåsmaskinerna stämmer tillräckligt bra för att kunna användas i beräkningarna.

3.1.2 UTVALD TIDSPERIOD

Vid framtagande av effektförbrukningsmodell (se avsnitt 3.2.6) utifrån driftdata samt jämförelse mellan nuvarande och simulerad styrning har datapunkter använts från en period då de nya maskinerna varit i drift. Då valdes perioden 2016-12-16 - 2017-03-29. Dock har de gamla maskinerna HST9000 varit avstängda under perioden 2017-02-23 - 2017-03-29.

3.2 MODELLERING OCH BERÄKNINGSMETODER

Optimering och simulering av styrstrategin på Bromma reningsverk samt jämförelse mellan nuvarande styrsystem och optimerad styrstrategi har gjorts med hjälp av olika beräkningsmetoder. Anpassning av modell utifrån driftkurvor, effektivitetsberäkningar samt minsta kvadratmetoden har använts i detta projekt.

3.2.1 ANTAGANDEN

För beräkningarna för att ta fram optimerad styrstrategi har ett antal antaganden gjorts. Ett första antagande är att det antingen inte blir någon extra energikostnad att stänga av eller sätta igång blåsmaskinerna, eller att denna energikostnad åtminstone är försumbar. Ett annat antagande är att mottrycket för blåsmaskinerna är konstant på ca 50 kPa, vilket är en förutsättning för att kunna utgå från Sultzers driftkurvor och beräkna det effektivaste antalet blåsmaskiner för ett visst flöde.

Beräkningarna har utgått från att det är effektivast att koppla in de nya maskinerna i första hand eftersom driftinformationen om respektive blåsmaskinstyp anger att HST40 är effektivast av de två blåsmaskinstyperna. Behovet av motionskörning av de gamla maskinerna har inte tagits hänsyn till vid framtagandet av optimerad styrstrategi, utan det är antingen en nödvändig utökning som behöver göras eller något som får ställas in manuellt i driften.

3.2.2 RANDVILLKOR

I MATLAB-scriptet som genomförde optimeringen av styrstrategin gjordes beräkningarna utifrån ett antal särskilda randvillkor. Ett villkor som uträkningarna förhåller sig till är maximal och minimal kapacitet för luftflöden för HST40 respektive HST9000. För HST40 är minimiflödet $6000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ och maximumflöde $15600 \text{ Nm}^3/\text{h}$. Med Nm^3 avses normalkubikmeter, vilket är en volymenhet där volymen normaliserats mot ett särskilt tryck och en särskild temperatur. I detta fall anger 1 Nm^3 samma mängd gas som 1 m^3 gas vid trycket 1 atm och 0° C . Värdena på dessa luftflöden är framtagna genom försök på Bromma reningsverk. Minimum- och maximumluftflöden för blåsmaskinerna av typ HST9000 är $3500 \text{ Nm}^3/\text{h}$ och $9000 \text{ Nm}^3/\text{h}$. Minimum- och maximumflöden för HST9000 är dock framtagna i labmiljö och inte genom drift vilket gör att det inte finns någon garanti för att dessa gränsvärden fullständigt speglar verkligheten (Fujii, 2017b).

3.2.3 MINSTA KVADRATMETODEN

Minsta kvadratmetoden används för att skatta den okända vektorn θ givet mätdata av typen $\{y(t), \varphi(t)\}_{t=1, \dots, N}$ hämtat från ett system som ska undersökas, i detta fall blåsmaskinerna på Bromma reningsverk och deras effektförbrukning. N anger antalet insamlade datapunkter. För att minsta kvadratmetoden ska vara möjlig att använda förutsätts att det aktuella systemet kan beskrivas med hjälp av en linjär regres-

sionsmodell av känd struktur men med okända parametrar. Ett enkelt exempel på en linjär regressionsmodell är ett polynom $y(t) = a_0 + a_1t + \dots + a_r t^r$ som kan skrivas på formen $y(t) = \varphi(t)^T \theta$, där $\theta = [a_0 \ a_1 \ \dots \ a_r]^T$ och utgör en vektor av okända koefficienter och vektorn $\varphi(t)$ definieras som $\varphi(t) = [1 \ t \ \dots \ t^r]^T$. Givet mätdata $Y(1), Y(2), \dots, Y(N)$ minimeras minstakvadratkriteriet

$$V(\theta) = \sum_{t=1}^N (y(t) - \hat{y}(t))^2 = \sum_{t=1}^N (y(t) - \varphi^T(t)\theta)^2 \quad (1)$$

av

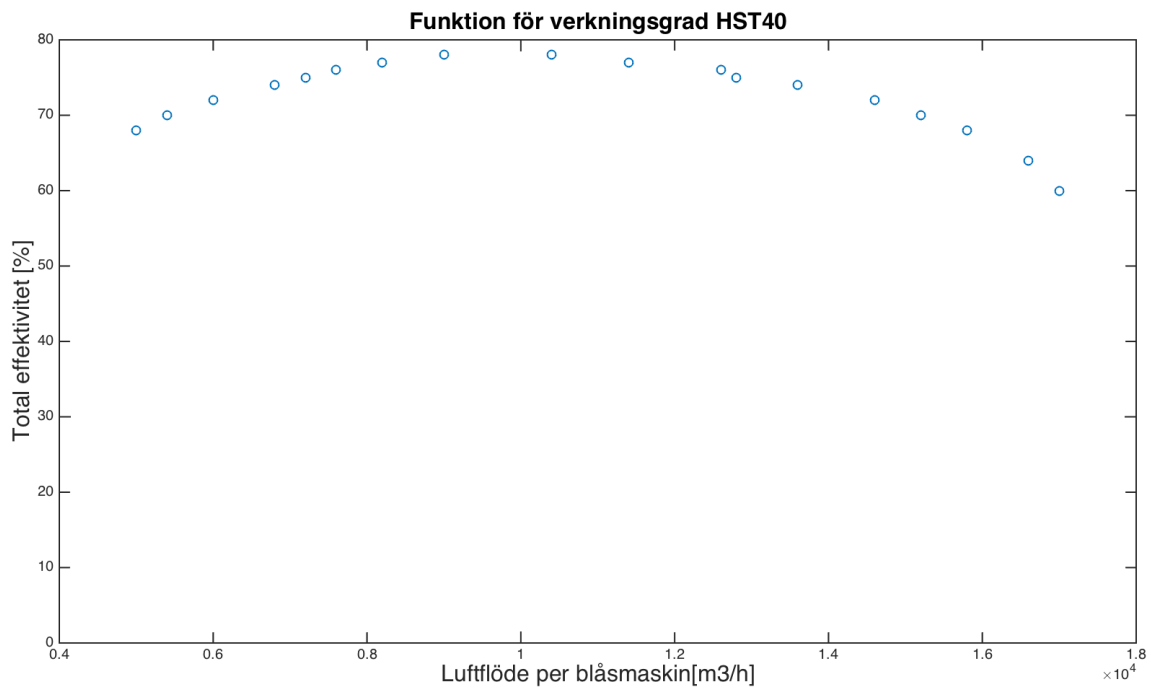
$$\hat{\theta} = \left[\sum_{t=1}^N \varphi(t)\varphi^T(t) \right]^{-1} \sum_{t=1}^N \varphi(t)y(t) \quad (2)$$

Detta förutsätter emellertid att matrisen $\sum_{t=1}^N \varphi(t)\varphi^T(t)$ är inverterbar (Söderström & Stoica, 2001).

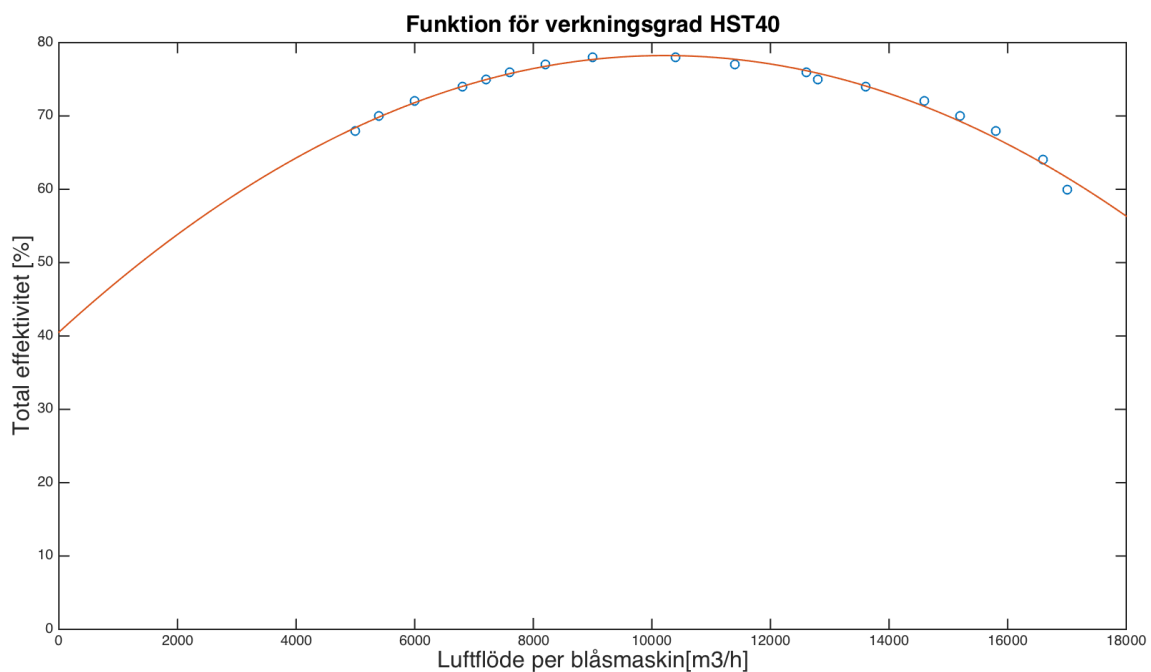
Skattningen (2) kan enkelt göras i MATLAB med exempelvis backslashoperatorm eller funktionen `polyfit`.

3.2.4 POLYNOMANPASSNING

Från leverantören av blåsmaskinerna till Bromma reningsverk, Sulzer, fanns så kallade driftkurvor tillgängliga för både de nya maskinerna (HST40) och de gamla maskinerna (HST9000) (Appendix A). Driftkurvorna visar maskinernas verkningsgrad och varvtal vid ett särskilt mottryck och luftflödesproduktion. Från driftkurvorna har ett antal punkter lästs av vid mottrycket 50 kPa som blåsmaskinerna på Bromma reningsverk vanligtvis arbetar vid (Fujii, 2017c). Utifrån dessa punkter har ett polynom för respektive blåsmaskinstyp anpassats med minsta kvadratmetoden (se avsnitt 3.2.3), där polynomet ger maskinens verkningsgrad som funktion av luftflödet per maskin. Polynomordningen valdes till 2 efter ockulär analys av de datapunkter polynomet anpassats efter. I figur 3.1 är effektdata plottat mot luftflödesdata. I figur 3.2 visas en grafisk illustration av polynompassningen till driftdata för de nya blåsmaskinerna HST 40.



Figur 3.1. Verkningsgrad plottat mot luftflödesdata för blåsmaskiner av typ HST 40.



Figur 3.2. Polynom Anpassning till driftdata för HST 40

De anpassade polynomen fick båda ett R^2 -värde på 0.98. Polynomet $p1$ som tagits fram från verkningsgradskurvor för blåsmaskinerna av typ HST40 hade ett maxfel på -2.7 % samt ett medelfel på -0.011 %.

Polynomet p_2 som anpassats efter verkningsgradskurvor för blåsmaskinerna av typ HST9000 hade ett maxfel på -1.5 % och ett medelfel på -0.011 %. Modellfelen bedöms vara helt försumbara jämfört med andra osäkerheter i studien. Polynomen finns utskrivna i ekvation (5) i avsnitt 3.2.6.

3.2.5 OPTIMERING AV STYRSTRATEGI

För att uppnå ett visst totalt luftflöde som ska syresätta luftningsbassängerna på Bromma reningsverk finns det ett nära oändligt antal olika sätt att kombinera olika luftflöden och olika antal maskiner. Exempelvis för att uppnå ett totalt luftflödesbehov på $30\,000\text{ Nm}^3/h$ är det möjligt att låta två maskiner generera $15\,000\text{ Nm}^3/h$ vardera, låta tre maskiner generera $10\,000\text{ Nm}^3/h$ vardera eller låta ett varierande antal maskiner generera luftflöden av olika storleksordning som tillsammans summeras till det önskvärda totala luftflödet på $30\,000\text{ Nm}^3/h$. Vid optimeringen av styrstrategi för blåsmaskinerna på Bromma reningsverk togs ett MATLAB-script fram där det genom Monte Carlo-simulering slumpgenererades fram ett stort antal kombinationer av luftflöden per maskin och antal blåsmaskiner som är i drift. Detta gjordes för varje totalt luftflöde som är önskvärdt att blåsmaskinerna på Bromma reningsverk ska kunna leverera. Genom att beräkna den totala effektiviteten för olika kombinationer av luftflöden och antal blåsmaskiner kunde de effektivaste kombinationerna identifieras av MATLAB-scriptet. Den totala effektiviteten definierades och beräknades med hjälp av ekvation (3).

$$E_{tot} = \frac{\sum Q_i \cdot \eta_i}{\sum Q_i} \quad (3)$$

där E_{tot} är den totala effektiviteten viktad mot flödet från de olika blåsmaskinerna, Q_i luftflödet från den i :te blåsmaskinen och η_i är verkningsgraden för den i :te blåsmaskinen vid luftflödet Q_i . η_i beräknades med de framtagna polynomen som beskrivs i avsnitt 3.2.4 och finns utskrivna i ekvation (5) och (6) i avsnitt 3.2.6. De kombinationer av luftflöden som var effektivast för respektive totala luftflödesbehov utgjorde därefter den effektivaste styrstrategin för Bromma reningsverk enligt de teoretiska beräkningarna.

3.2.6 MODELLERING AV EFFEKTFÖRBRUKNING

För att kunna jämföra den modellerade styrningen med den styrning som används i dagsläget behövs en modell som beräknar om producerade luftflöden till effektförbrukning. Detta gjordes genom att utgå från

följande samband

$$P_{modell} \propto \frac{Q}{\eta} \quad (4)$$

där P_{modell} är modellerad effektförbrukning [kW], Q är total mängd producerat luftflöde [m^3/h] och η är verkningsgraden [%].

Ekvation (4) användes för att modellera effektförbrukningen för den simulerade, optimerade styrstrategin. Detta gjordes för ett totalt luftningsbehov mellan 5000 och 55 000 Nm^3/h . Verkningsgraden η beräknades utifrån dessa flöden med hjälp av de framtagna polynom som ger verkningsgrad som funktion av luftflöden

$$\eta_1(Q_1) = p_1 = -3.614 \cdot 10^{-7} \cdot Q_1^2 + 7.385 \cdot 10^{-3} \cdot Q_1 + 40.52 \quad (5)$$

$$\eta_2(Q_2) = p_2 = -7.874 \cdot 10^{-7} \cdot Q_2^2 + 9.976 \cdot 10^{-3} \cdot Q_2 + 38.88 \quad (6)$$

där η_1 är verkningsgraden för HST40, Q_1 är det luftflöde som produceras av en HST40, p_1 är polynomet för HST40. η_2 , Q_2 och p_2 är motsvarande för HST9000.

Effektförbrukningen som beräknas med (4) måste dock kalibreras genom att ta fram en proportionalitetskonstant och kan skrivas om enligt följande

$$P_{modell} = k \cdot \frac{Q}{\eta} \quad (7)$$

där k [N/m^2] är proportionalitetskonstanten.

För att avgöra om ekvation (7) är en användbar metod för att beräkna effektförbrukningen för den simulerade styrningen utnyttjades tillgängliga driftdata för effektförbrukningen för blåsmaskinerna. Teoretisk effektförbrukning modellerades för de motsvarande luftflöden för vilka det redan fanns effektförbrukningsmätningar för att möjliggöra jämförelsen. Hur väl det modellerade och det uppmätta data-

setet passade varandra beräknades med

$$FIT = 1 - \frac{\sqrt{\sum |y - \hat{y}|^2}}{\sqrt{\sum |y - \bar{y}|^2}} \quad (8)$$

där FIT är ett tal mellan $-\infty$ och 1, \hat{y} är skattade/modellerade värden och \bar{y} är medelvärdet av uppmätta data. Ett värde på FIT nära 1 innebär att modellen beräknar värden på effektförbrukningen med få fel medan $FIT = 0$ innebär att modellen inte ger en bättre skattning än medelvärdet.

Modellen för att beräkna effektförbrukningen för den simulerade optimala styrstrategin togs fram utifrån driftdata från tidsperioden 2016-12-16 - 2017-03-29 under vilken både de nya och gamla blåsmaskinerna varit i drift. Data fanns för både effektförbrukning samt motsvarande luftflöde. Med data för luftflödena som indata beräknades en teorisk effektförbrukning med ekvation (7).

4 RESULTAT

4.1 NUVARANDE STYRNING

4.1.1 STYRRITNINGAR

För att kartlägga nuvarande styrning av Bromma reningsverks blåsmaskiner studerades ritningar över styrprocessen (Appendix C). Från dessa framkom inget nytt i detalj. Däremot gick det att översiktligt se att medianen från tre manifoldtryckmätningar används för att beräkna styrsignalen till blåsmaskinregulatorn. Detaljer kring hur denna beräkning går till eller vad beräkningen grundar sig på gick inte att utläsa. I styrritningarna beskrivs kölogiken för de olika blåsmaskinerna, detta var dock för komplicerat för att kunna tyda hur denna kö fungerar. Kopplat till denna kölogik finns funktionen ”ladda kö” som dock inte används alls på Bromma reningsverk i dagsläget (Sigfridsson, 2017b). Stockholm Vatten och Avfall kommer att ge i uppdrag åt leverantören att göra en genomgång av nuvarande styrning och redovisa resultatet.

4.1.2 UTIFRÅN DRIFTDATA

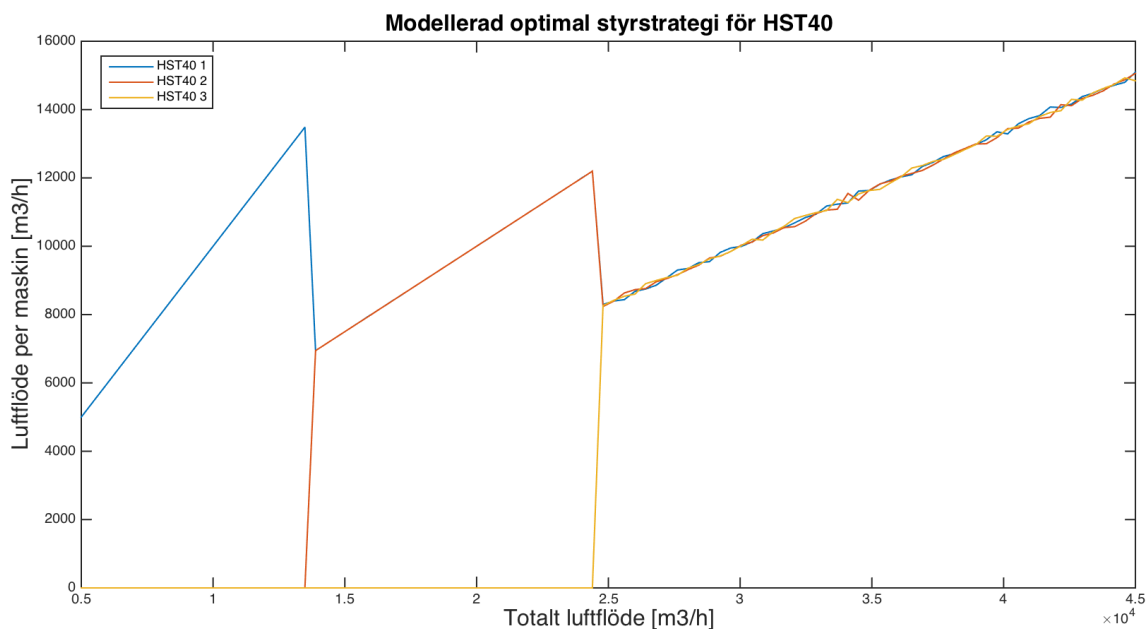
Från granskning av driftdata framgick mellan vilka intervall av luftflöden ett visst antal maskiner var i drift. Dessa redovisas nedan i tabell 4.1.

Tabell 4.1. Blåsmaskinstyrning vid Bromma reningsverk utifrån driftdata. Luftflödesintervallerna går från det lägsta till högsta flöde som förekommer i de uppmätta dataserierna för respektive antal blåsmaskiner som är i drift.

Totalt luftflöde [Nm^3/h]	Antal nya blåsmaskiner i drift	Antal gamla blåsmaskiner i drift
11400 - 19800	2	0
19800 - 29700	3	0
29700 - 42600	3	1
42600 - 48700	3	2

4.2 OPTIMERING AV STYRSTRATEGI

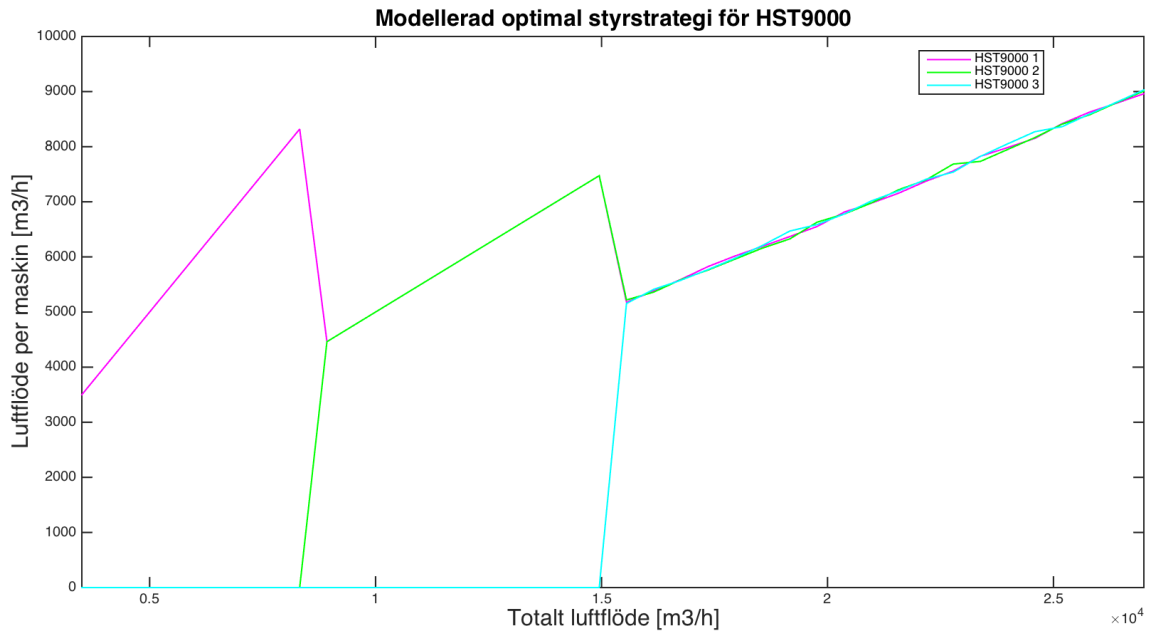
Optimeringen av styrstrategi för nya blåsmaskiner (HST40) och gamla blåsmaskiner (HST9000) gjordes först i två separata script som sedan kombinerades till ett enda script. Fullständig MATLAB-kod för beräkningarna finns i Appendix B. Resultatet för en körning med enbart nya blåsmaskiner (HST40) i drift visas i figur 4.1



Figur 4.1. Den modellerade optimala styrstrategin för enbart blåsmaskinerna av typ HST40 på Bromma reningsverk

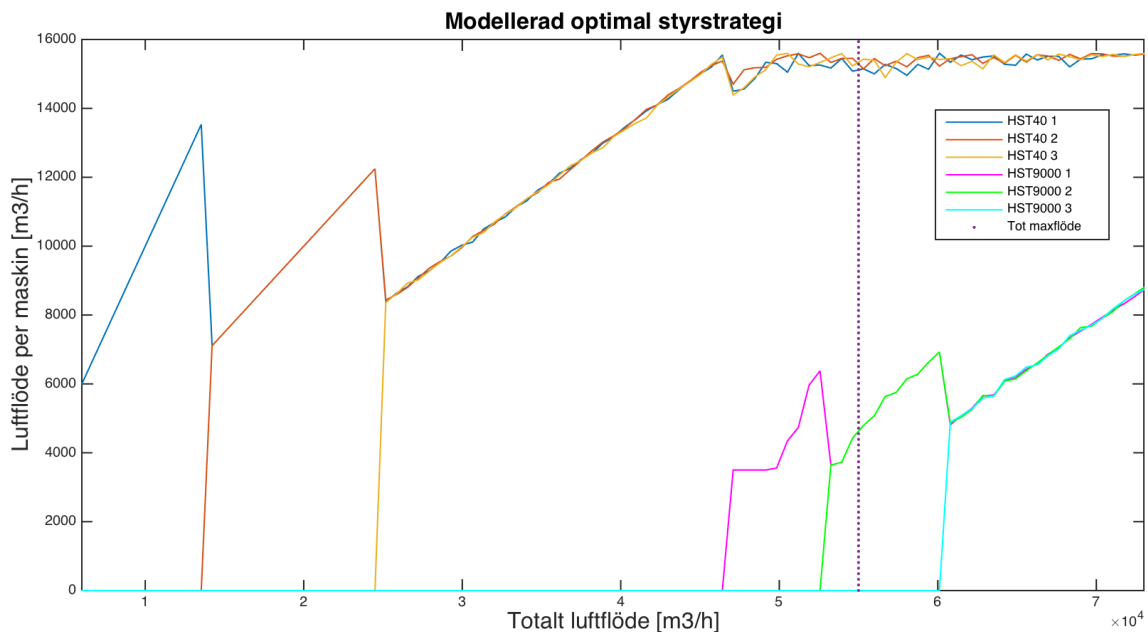
Enligt optimeringen är det effektivast att köra igång en blåsmaskin med en jämn luftflödesökning fram tills ett visst flöde då nästa maskin kopplas in. Samma princip gäller för ett fall då enbart gamla blås-

maskiner skulle vara i drift, dock med annorlunda flöden vid vilka nya maskiner kopplas in (figur 4.2).



Figur 4.2. Den modellerade optimala styrstrategin för enbart blåsmaskinerna av typ HST9000 på Bromma reningsverk

Resultatet från den modellerade optimala styrstrategin där både nya och gamla blåsmaskiner är i drift visas i figur 4.3 nedan.



Figur 4.3. Den modellerade optimala styrstrategin för blåsmaskinerna på Bromma reningsverk. Den streckade linjen visar Bromma reningsverks maxkapacitet för luftflöde i luftningsssystemet.

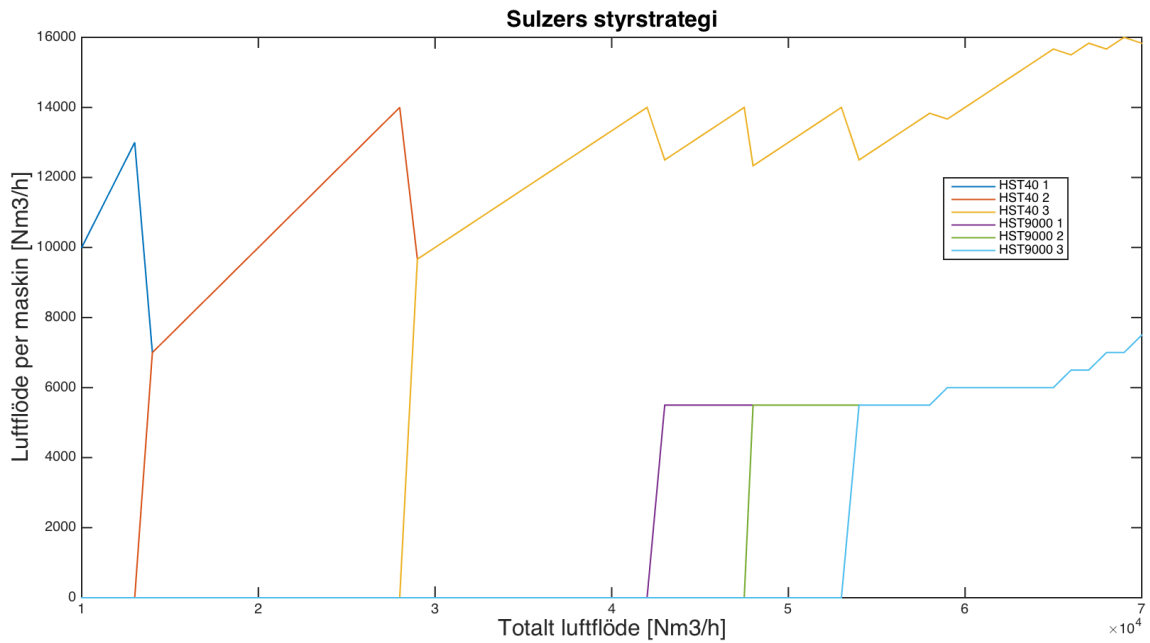
Från simuleringen framgår att det är effektivast att köra de nya maskinerna så att det totala luftflödet fördelas jämnt mellan maskinerna, det vill säga samtliga maskiner går på samma varvtal och levererar samma luftflöde. Samma princip gäller för de gamla blåsmaskinerna när dessa kopplas in, dock är det inte aktuellt att köra fler än två gamla blåsmaskiner på Bromma då det inte krävs fler för att uppnå det maxluftflöde som är möjligt för reningsverket. Den simulerade optimala styrstrategin visas nedan i tabell 4.2.

Tabell 4.2. Simulerad styrstrategi för blåsmaskiner på Bromma reningsverk

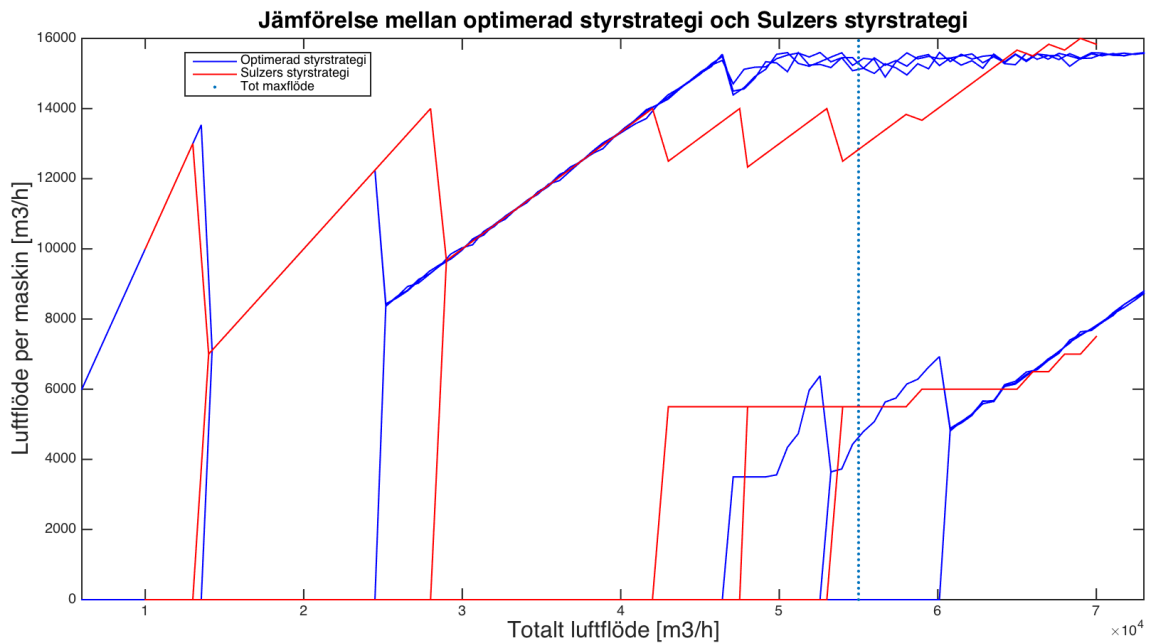
Totalt luftflöde [Nm^3/h]	Antal nya blåsmaskiner i drift	Antal gamla blåsmaskiner i drift
6000 - 13500	1	0
13500 - 24500	2	0
24500 - 46500	3	0
46500 - 52500	3	1
52500 - 60500	3	2
60500 - 73800	3	3

För att underlätta jämförelse mellan den optimerade styrstrategin och Sulzers föreslagna styrstrategi har

följande figurer tagits fram. Figur 4.4 baseras på Tabell 2 i Appendix A och visar Sulzers rekommenderade styrstrategi. Figur 4.5 kombinerar figur 4.4 och den optimerade styrstrategin.



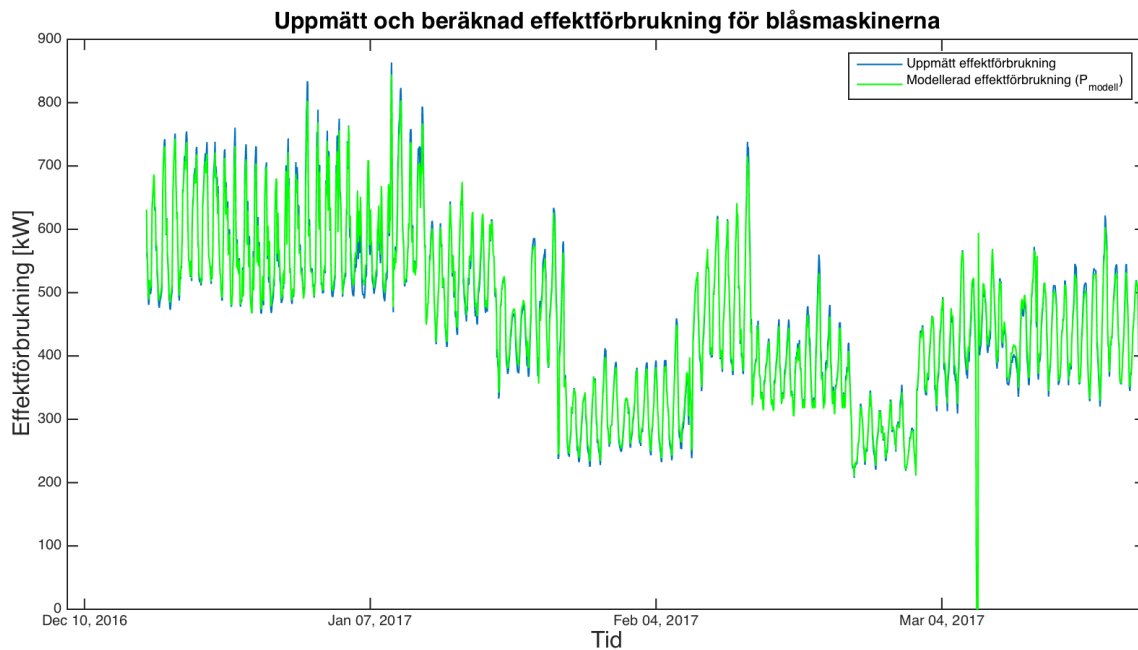
Figur 4.4. Simulerad optimal styrstrategi och Sulzers förslag på styrstrategi



Figur 4.5. Sulzers förslag på styrstrategi, baserat på tabell 2 i appendix A

4.3 JÄMFÖRELSE MELLAN NUVARANDE OCH OPTIMERAD STYRNING

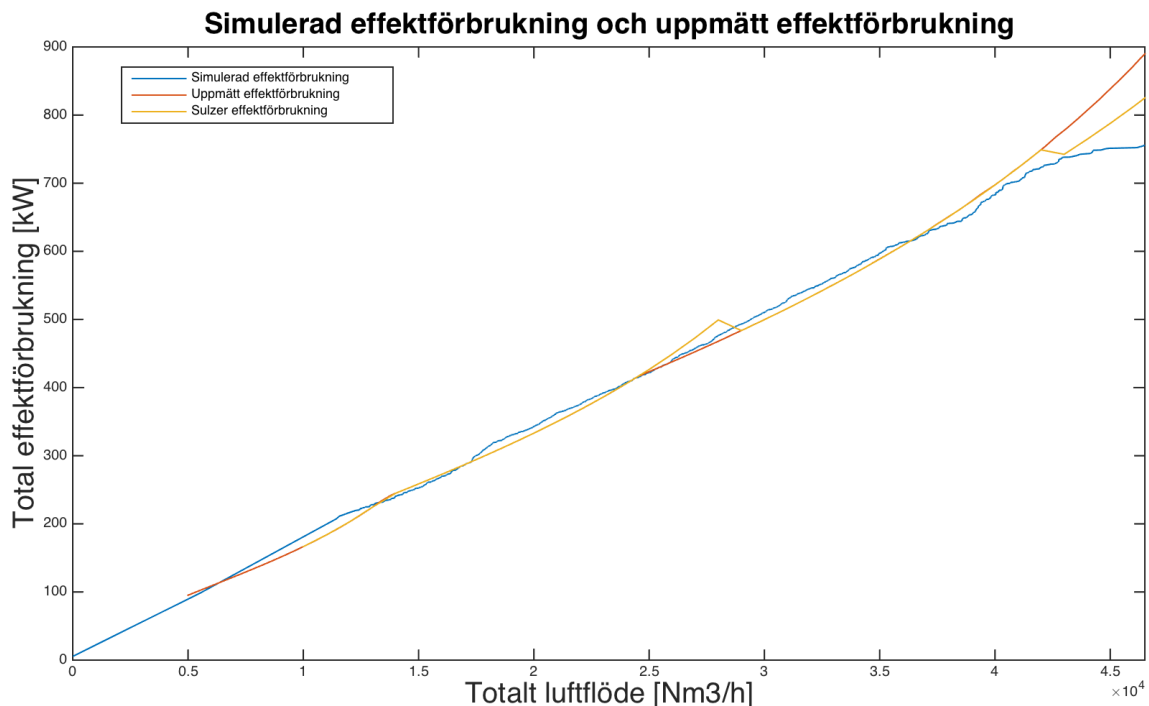
Framtagandet av en effektförbrukningsmodell resulterade i att proportionalitetskonstanten i ekvation (7) skattades till $k = 1.30$. Detta gjordes med minsta kvadratmetoden.



Figur 4.6. Uppmätt och modellerad effektförbrukning.

Figur 4.6 illustrerar verkliga effektdata tillsammans med modellerade effektdata. Det syns tydligt att den modellerade effektförbrukningen P_{modell} (grön) är proportionell mot den uppmätta effektförbrukningen (blå) samt är välanpassad till den uppmätta effektförbrukningen. Beräknad *FIT* för P_{modell} var 93.2 %, modellen bedömdes därmed vara användbar för effektberäkningar.

Med hjälp av denna effektförbrukningsmodell gjordes en jämförelse mellan effektförbrukning mellan nuvarande styrstrategi och modellerad optimerad styrstrategi. Jämförelsen mellan effektförbrukningen visas i figur 4.7 nedan



Figur 4.7. Effektförbrukning för optimerad styrstrategi, nuvarande styrstrategi samt Sulzers föreslagna styrstrategi vid motsvarande luftflöden.

Figuren visar den beräknade effektförbrukningen för den modellerade optimala styrstrategin (blå linje), uppmätt effektförbrukning för verkliga driftdata (röd linje) samt beräknad effektförbrukning för Sulzers föreslagna styrstrategi (gul linje) vid motsvarande totala luftflöde. Jämförelsen har gjorts med den simulerade optimala styrstrategin för fallet att endast nya maskiner är i drift.

5 DISKUSSION

5.1 STYRSTRATEGI

5.1.1 JÄMFÖRELSE MELLAN SULZERS STYRSTRATEGI OCH OPTIMERAD STYRSTRATEGI

I figur 4.3 visas att luftflödesökningen samt vilket maxluftflöde som ska genereras per maskin skiljer sig åt mellan när det är en, två eller tre nya maskiner i drift. Detta beror på att flera maskiner tillsammans kan generera ett större luftflöde än en ensam maskin, vilket kräver en mindre ökning av producerat luftflöde per maskin för att uppnå ett ökande totalt luftflödesbehov. Att de nya maskinerna fortsätter öka luftflödet

per maskin och att de gamla maskinerna kopplas in först när de nya maskinerna nått sin maxkapacitet visar på att de nya maskinerna är så pass mycket mer effektiva än de gamla att det inte är energieffektivt att sätta in de gamla maskinerna i drift tidigare.

Den övergripande skillnaden mellan Sulzers rekommendation på styrstrategi och den simulerade optimerade styrstrategin är att den simulerade strategin tidigare låter de nya maskinerna generera en högre luftflödesproduktion (se figur 4.5). Sulzer rekommenderar istället att de nya maskinerna ska närma sig sin maxkapacitet först vid ett totalt luftflöde på ca $60000 \text{ m}^3/h$. Totalluftflödena där antalet maskiner i drift ändras skiljer sig åt mellan de olika styrstrategierna så när som på mellan totalluftflöden mellan 0 och ca $25000 \text{ m}^3/h$ där strategierna är väldigt lika. Därefter låter den simulerade strategin den tredje nya blåsmaskinen sättas i drift tidigare samt låter de gamla blåsmaskinerna sättas igång senare än Sulzers styrning.

Principen för både Sulzers styrstrategi och den simulerade optimerade styrstrategin är densamma, det vill säga att luftflödesproduktionen är jämnt fördelad mellan de maskiner som är av samma modell för de luftflöden då det krävs att fler än en maskin är i drift. Att den simulerade styrstrategin hamnar så pass nära Sulzers förslag utifrån labresultat indikerar på att den simulerade styrstrategin troligtvis stämmer samt påvisar att en styrstrategi med jämnt fördelat luftflöde mellan blåsmaskinerna är optimalt. Att den simulerade optimerade styrstrategin är att föredra framför Sulzers indikeras även av figur 4.7 som visar på att den senare styrstrategin är mer energikrävande.

Slutligen bör nämnas att det är önskvärt att lägga till en hysteres, det vill säga ett tröskelvärde med vilket luftflödesbehovet ska understiga eller överstiga innan en blåsmaskin slås på eller av, till den optimerade styrstrategin om det blir aktuellt att implementera denna på Bromma. En hysteres behövs för att blåsmaskinerna inte ska slås av och på för ofta när luftflödesbehovet varierar nära de gränser där styrstrategin beordrar att en blåsmaskin ska sättas i drift eller tas ur drift.

5.1.2 NUVARANDE STYRNING

Från tabell 4.1 och tabell 4.2 utlästes den mest uppenbara skillnaden mellan nuvarande styrning och den optimerade styrningen vara att nuvarande styrning sätter nya maskiner i drift vid lägre totala luftflöden än den optimerade styrstrategin. Detta bör innebära att den optimerade styrstrategin låter de individuella

blåsmaskinerna uppnå en större maximal luftflödesproduktion, förutsatt att den nuvarande styrstrategin fördelar luftflödesproduktionen jämnt mellan maskinerna. Utöver detta var det svårt att avgöra i detalj hur nuvarande styrning ser ut då den information som framkommit från styrriktningarna varit sparsam. En förklaring till att nuvarande styrning låter de gamla blåsmaskinerna sättas i drift tidigare jämfört med den optimerade styrningen är att låta de gamla maskinerna motionsköras oftare, ett behov som ej tagits hänsyn till vid framtagandet av den optimerade styrstrategin.

5.1.3 EFFEKTFÖRBRUKNING

Från resultaten framgick att simulerad optimal styrstrategi och nuvarande styrstrategi är någorlunda lika ur energiförbrukningssynpunkt. Figur 4.7 ger dock enbart jämförelse mellan nuvarande och optimerad styrstrategi fram tills det totala luftflödesbehov där strategin anser att det är dags att koppla in den första gamla blåsmaskinen i drift. I figuren visas att effektförbrukningen är i princip identisk mellan de två olika styrstrategierna fram till ett totalluftflöde på ca $41000 \text{ Nm}^3/h$. Efter detta flöde avtar effekt-förbrukningsökningen för den optimerade styrstrategin. Utifrån driftdata och tabell 4.1 är detta inom det intervall där minst en gammal maskin brukar vara i drift. Emellertid är det svårt att avgöra hur väl detta intervall stämmer då det dels är driftdata från en begränsad tidsperiod, och dels finns hystereser inlagda i nuvarande styrsystem som gör att det blir en fördröjning och att luftflödesbehovet behöver nå ett visst antal procent över den satta gränsen under en viss tid för att antalet blåsmaskiner i drift ska ändras. Kopplat till tidigare forskning överensstämmer dock resultatet med Keskar (2005) som hävdar att det finns potential för energibesparingar med en varvtalsreglering som den optimerade styrstrategin i praktiken är. Liksom Keskar (2005) har det även observerats att effektiviteten för styrstrategin varit lägre vid låga luftflöden (och då i praktiken vid låga varvtal).

Med den optimerade styrstrategin sätts de gamla maskinerna inte i drift förrän vid ett totalt luftflödesbehov på $46500 \text{ Nm}^3/h$. Detta tyder på att den nuvarande styrstrategin kopplar in de gamla blåsmaskinerna för tidigt för att det ska vara optimalt ur energisynpunkt och därmed förbrukar mer energi jämfört med den optimerade styrstrategin. Däremot går det inte att dra några slutsatser utifrån figur 4.7 och vad den jämförelsen säger om förhållandet mellan de olika styrstrategierna efter ett totalt luftflödesbehov på över $46500 \text{ Nm}^3/h$. Resultatet från figur 4.7 är även överensstämmande med tidigare forskning som konstaterat att det är möjligt att göra energibesparingar med blåsmaskiner med varierande effektivitet (Schraa et. al., 2017).

5.2 VIDARE UNDERSÖKNINGAR

Eftersom den metod som använts för att simulera den optimala styrstrategin har utgått från att mottrycket är konstant och ligger på en specifik nivå i reningsverket vore det intressant att utvidga studien. En mer avancerad modell som beräknar optimalt antal blåsmaskiner i drift utifrån både luftflödesbehov och mottryck skulle därför varit en lämplig möjlig utökning av studien. Trycket är en viktig aspekt att ha med om alternativa styrstrategier så som MOV ska användas eftersom en sådan styrstrategi påverkar mottrycket i manifoldern. Vidare vore det intressant att implementera den simulerade optimala styrstrategin på Bromma reningsverk för att få effektdata och verifiera ifall denna styrning är bättre eller lika effektiv som nuvarande styrning.

5.3 FELKÄLLOR

Ett antal felkällor går att identifiera som kan påverka resultaten och slutsatserna negativt. En sådan är att de datapunkter som använts till polynomanpassning har lästs av manuellt utifrån en figur. Felavläsning skulle resultera i följdfelet då verkningsgraden beräknas vid framtagandet av den nya, optimerade styrstrategin. Då den beräknade verkningsgraden används vidare i beräkningarna av effektförbrukning skulle det innebära ytterligare följdfelet om den beräknade verkningsgraden inte stämmer.

Ett antagande som kan ha bidragit till felaktigheter i resultatet är antagandet att start och stopp av blåsmaskinerna inte påverkar energiförbrukningen. I verkligheten används, som tidigare nämnts, så kallade hystereser för att undvika att blåsmaskinerna slås av och på för ofta eftersom detta leder till en ökad energikostnad. Hur mycket detta antagande påverkat resultaten är svårt att bedöma, och en skattning av hur energikrävande start av blåsmaskiner är bör göras om studien görs om eller utvidgas.

En annan möjlig felkälla är metodvalet för optimeringen, då framtagandet av det optimala antalet blåsmaskiner för ett visst luftflödesbehov har skett genom beräkningar med framslumpade luftflöden. Med en stokastisk modell finns alltid en risk att optimala punkter missas om det inte slumpas fram tillräckligt många tal och att man alltså kör för få körningar i loopen i MATLAB-scriptet. Ett metodval som hade minskat denna risk är Grid search method (Rao, 1996) som metodiskt går igenom ett jämnt fördelat antal

punkter inom det aktuella flödesintervallet.

Slutligen är modeller alltid just modeller och inte en exakt beskrivning av verkligheten vilket gör att exempelvis effektförbrukningsberäkningarna medför att fel uppstår, vilket är viktigt att ta hänsyn till när dessa jämförs med verkligt uppmätta effektdata.

6 SLUTSATSER

En optimal styrstrategi för Bromma reningsverk bör vara utformad så att det producerade luftflödet är jämnt fördelat mellan de olika blåsmaskintyperna där de nya maskinerna sätts i drift i första hand. Metoden som optimerar styrstrategin utgår från hur verkningsgraden för de olika maskintyperna ändras vid olika luftflöden. Den totala effektiviteten för de olika luftflödena och antal blåsmaskiner i drift beräknas och den effektivaste kombinationen bestäms utifrån ekvation (3). Stockholm Vatten och Avfall använder troligen redan en nära optimal styrning för blåsmaskinerna på Bromma reningsverk vid användning av de nya blåsmaskinerna. Eventuellt kan energibesparingar göras vid stora luftflödesbehov då även gamla maskiner krävs för att uppfylla behovet. Dock är nuvarande styrning inte tillräckligt utredd för att det ska vara känt exakt vid vilka flöden antalet blåsmaskiner ändras, men driftdata indikerar på att de gamla blåsmaskinerna i nuläget sätts i drift för tidigt för att det ska vara optimalt ur energisynpunkt. En möjlig förklaring till att de gamla maskinerna sätts i drift tidigare skulle kunna vara att det är en del av att låta de gamla blåsmaskinerna motionsköras oftare.

7 REFERENSER

Alex, J., Rieger, L. och Schraa, O. (2016). *Comparison of Advanced Fine-Bubble Aeration Control with Respect to Energy Efficiency and Robustness*. Water Environment Federation, Vol 12., ss. 136 - 147.

Arnell, M. (2016). *Performance Assessment of Wastewater Treatment Plants: Multi-Objective Analysis Using Plant-Wide Models*. Diss. Lunds Universitet. Lund: Media-Tryck.

Arévalo, T.F. (2016). *New Heat Transfer and Operating Cost Models for the Plant-wide Simulations of Full-scale WWTPS*. Diss. Tecnum Universidad de Navarra. San Sebastián.

Caivano, M., Bellandi, G., Mancini, I.M., Masi, S., Brienza, R., Panariello, S., Gori, R. och Caniani, D. (2017). *Monitoring the aeration efficiency and carbon footprint of a medium-sized WWTP: experimental results on oxidation tank and aerobic digester*. Environmental Technology. Vol 38. (5), ss. 629 - 638.

The International Water Assosiation (IWA) (n.d.). *Activated Sludge Process*. Tillgänglig: <http://www.iwapublishing.com/news/activated-sludge-process> [2017-04-21]

Jenkins, T. (2013). *Aeration Control System Design*. Hoboken, New Jersey: Wiley.

Jenkins, D., Wanner, J. (2014). *Activated Sludge - 100 Years and Counting*. London: IWA Publishing.

Jung, U.H., Kim, S., Jeong, K.H., Kim, J.H., Lee, K.Y., Choi, Y.S. (2016). Numerical study on performance improvement when strong vortex occurs on the shroud of vaneless diffuser in turbo blower. *Journal of Mechanical Science and Technology*. Vol 30. (6), ss. 2515-2529.

Keskar, P. (2005). Aeration and DO Controls. I: Liptak, B. G. (red), *Instrument Engineers' Handbook: Process Control and Optimization*. Fjärde upplagan. CRC Press. ss 1484 - 1506.

Metcalf & Eddy (2014). *Wastewater Engineering. Treatment and Resource Recovery - Vol 1*. 5 uppl. Aecom.

Nordenborg, Å. (2011). *Luftflödesstyrning på Käppalaverket – utvärdering av konstanta styrsignaler* (Examensarbete i miljö- och vattenteknik). Uppsala universitet, institutionen för informationsteknologi. Uppsala: Geotryckeriet.

Olsson, G. (2008). *Effektivare rening: Några steg mot bättre energi- och resursutnyttjande*. Motala: Svenskt Vatten AB (Svenskt Vatten Utveckling Rapport, 2008:19)

Rao, S.S. (1996). *Engineering Optimization: Theory and Practice*. New York: John Wiley & Sons.

Rosso, D., Stenstrom, M.K. och Larson, L.E. (2008). *Aeration of large-scale municipal wastewater treatment plants: state of the art*. *Water Science and Technology*. 57(7), 973–8.

Schraa, O., Rieger, L., Alex, J. (2017). Development of a model for activated sludge aeration systems: linking air supply, distribution, and demand. *Water Science and Technology*. 75(3), ss. 552 - 560.

Stockholm Vatten (n.d.). *Bromma avloppsreningsverk - För stockholmarnas och miljöns bästa*. Tillgänglig: http://www.stockholmvattenochavfall.se/globalassets/pdf1/informationmaterial/broschyrer/avloppsverk/bromma_webb.pdf [2017-01-31]

Svenskt Vatten. (2013). *Avloppsteknik 2: Reningsprocessen*, 3:e upplagan, Åtta45 Tryckeri AB.

Söderström, T., Stoica, P. (2001). *System Identification*, Hertfordshire: Prentice Hall.

Thunberg, A. (2007). *Energieffektivisering av luftningssteget på Käppalaverket, Lidingö* (Examensarbete i miljö- och vattenteknik 20 hp). Uppsala universitet, institutionen för informationsteknologi. Uppsala: Geotryckeriet.

Åmand, L. (2013). *Styrning av luftningsprocesser i avloppsreningsverk*. Svenskt vatten AB (Svenskt Vatten Utveckling Rapport, 2013:18).

Åmand, L. (2014). *Ammonium Feedback Control in Wastewater Treatment Plants*. Diss. Uppsala Universitet. Uppsala: Elanders Sverige AB.

Personlig kommunikation

Fujii, Dan. 2017a. E-mail 6 februari. <dan.fujii@svoa.se>

Fujii, Dan. 2017b. E-mail 6 mars. <dan.fujii@svoa.se>

Fujii, Dan; Utredare på Stockholm Vatten och Avfall. 2017c. Intervju 18 januari.

Fujii, Dan; Utredare på Stockholm Vatten och Avfall. 2017d. Intervju 31 januari.

Fujii, Dan. 2017e. E-mail 18 augusti. <dan.fujii@svoa.se>

Hallin, Sara; Professor vid Institutionen för skoglig mykologi och växtpatologi; Markmikrobiologi, Sveriges Lantbruksuniversitet. 2015. Föreläsning 10 september.

Lindblom, Erik. 2017a. E-mail 29 mars. <erik.lindblom@svoa.se>

Lindblom, Erik; Strategisk processutvecklare Stockholm Vatten och Avfall. 2017b. Intervju 31 januari.

Lindblom, Erik. 2017c. E-mail 22 maj. <erik.lindblom@svoa.se>

Sigfridsson, Ove; Driftingenjör på Bromma reningsverk. 2017a. Intervju 7 februari.

Sigfridsson, Ove. 2017b. E-mail 10 mars. <ove.sigfridsson@svoa.se>

APPENDIX A

Avlopp
 AP
 Dan Fujii
 dan.fujii@stockholmvatten.se

PROMEMORIA

Till: Berörda

Ang: BM Nockeby - Styrning av blåsmaskiner

HST 40 (nya maskiner) har bäst verkningsgrad vid flöden mellan 7 000 och 14 000 Nm³/h (75 - 78 % verkningsgrad).

HST 9000 (gamla maskiner) har bäst verkningsgrad vid flöden vid mellan 5 000 och 6 000 Nm³/h (ca 70 % verkningsgrad).

Driften av samtliga blåsmaskiner optimeras för att kunna ligga mellan dessa flöden, samt att varje maskintyp ska köras på samma flöde (dvs nya körs på ett flöde och de gamla på ett annat flöde).

Tabell 1 Antal blåsmaskiner i drift av varje modell beroende på flödesbehov.

Flöden (Nm ³ /h)	Antal HST40	Antal HST9000
< 14 000	1	0
14 000 ≤ Q < 29 000	2	0
29 000 ≤ Q < 43 000	3	0
43 000 ≤ Q < 48 000	3	1
48 000 ≤ Q < 54 000	3	2
54 000 ≤ Q < 74 000	3	3

Det ska läggas in ett maxflöde om 55 000 Nm³/h då befintligt tilluftssystem inte klarar högre (risk för obalans i ventilationssystemet så att rum med undertryck får övertryck och vice versa).

Från operatörsbilden ska det gå att ställa in vid vilka flöden (eller %) nästa blåsmaskin ska kopplas in.

Operatören ställer in maskinkön som idag.

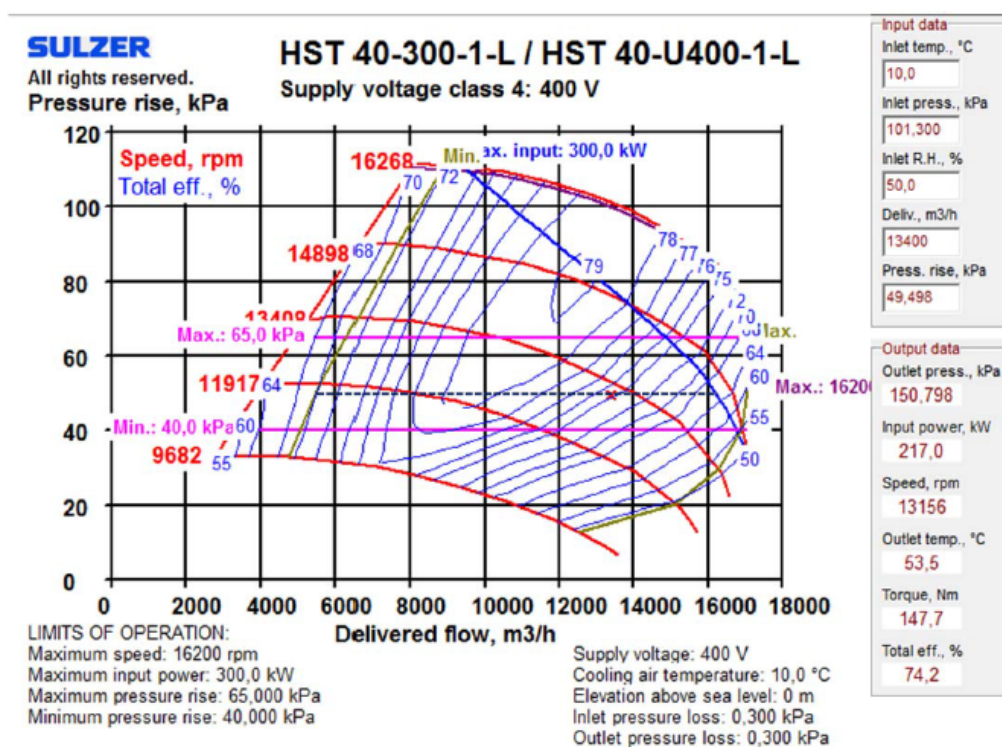
Normalt ska maskinerna 3,5 och 6 ställas in först i kön medan de gamla maskinerna (1,2 och 4) ställs sist i kön.

Tabell 2 Blåsmaskinstyrning.

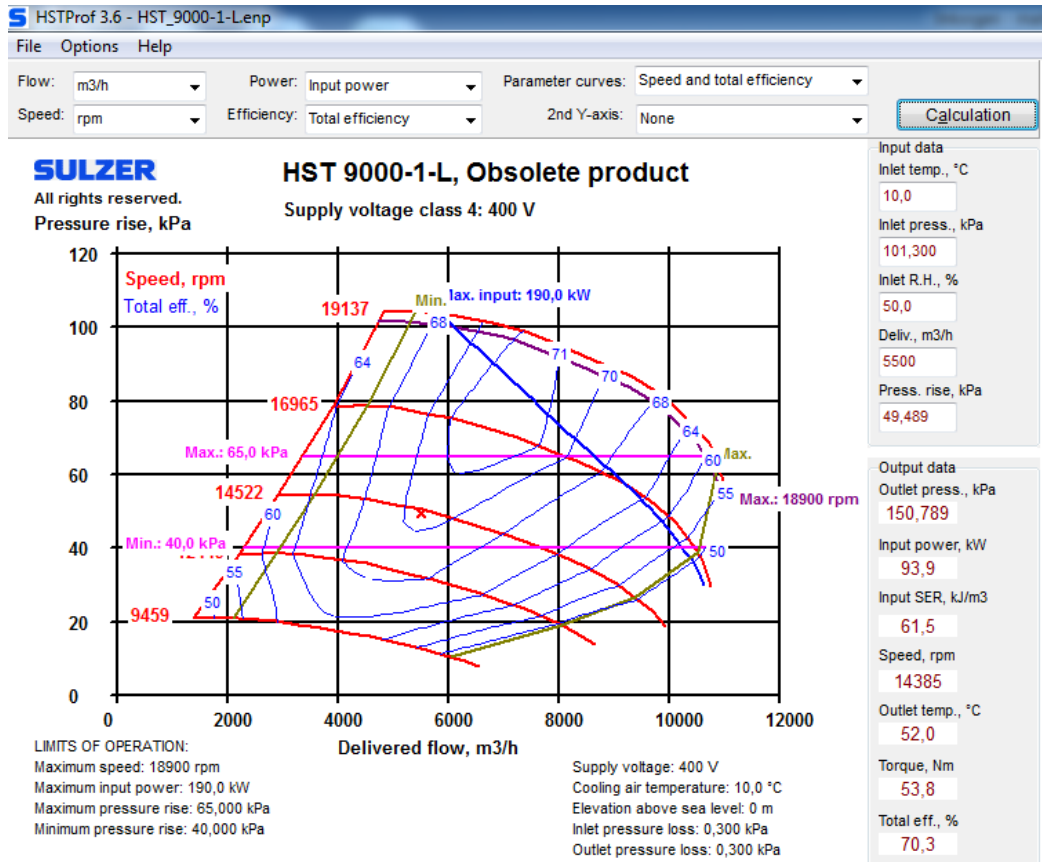
	Nm3/h							
	Flöde	HST 40	HST 40	HST 40	HST 3000	HST 3000	HST 3000	Summa HST40
	10 000	10 000						10 000
	11 000	11 000						11 000
	12 000	12 000						12 000
	13 000	13 000						13 000
	14 000	7 000	7 000					14 000
	15 000	7 500	7 500					15 000
	16 000	8 000	8 000					16 000
	17 000	8 500	8 500					17 000
	18 000	9 000	9 000					18 000
	19 000	9 500	9 500					19 000
	20 000	10 000	10 000					20 000
	21 000	10 500	10 500					21 000
	22 000	11 000	11 000					22 000
	23 000	11 500	11 500					23 000
	24 000	12 000	12 000					24 000
	25 000	12 500	12 500					25 000
	26 000	13 000	13 000					26 000
	27 000	13 500	13 500					27 000
	28 000	14 000	14 000					28 000
	29 000	9 667	9 667	9 667				29 000
	30 000	10 000	10 000	10 000				30 000
	31 000	10 333	10 333	10 333				31 000
	32 000	10 667	10 667	10 667				32 000
	33 000	11 000	11 000	11 000				33 000
	34 000	11 333	11 333	11 333				34 000
	35 000	11 667	11 667	11 667				35 000
	36 000	12 000	12 000	12 000				36 000
	37 000	12 333	12 333	12 333				37 000
	38 000	12 667	12 667	12 667				38 000
	39 000	13 000	13 000	13 000				39 000
	40 000	13 333	13 333	13 333				40 000
	41 000	13 667	13 667	13 667				41 000
	42 000	14 000	14 000	14 000				42 000
	43 000	12 500	12 500	12 500	5 500			37 500
	44 000	12 833	12 833	12 833	5 500			38 500
	45 000	13 167	13 167	13 167	5 500			39 500
	46 000	13 500	13 500	13 500	5 500			40 500
Maxflöde med 3 nya BM	47 000	13 833	13 833	13 833	5 500			41 500
	47 500	14 000	14 000	14 000	5 500			
	48 000	12 333	12 333	12 333	5 500	5 500		37 000
	49 000	12 667	12 667	12 667	5 500	5 500		38 000
	50 000	13 000	13 000	13 000	5 500	5 500		39 000
	51 000	13 333	13 333	13 333	5 500	5 500		40 000
	52 000	13 667	13 667	13 667	5 500	5 500		41 000
	53 000	14 000	14 000	14 000	5 500	5 500		42 000
	54 000	12 500	12 500	12 500	5 500	5 500	5 500	37 500
Flöde över 55 000 kräver SP1 och SP2.	55 000	12 833	12 833	12 833	5 500	5 500	5 500	38 500
	56 000	13 167	13 167	13 167	5 500	5 500	5 500	39 500
	57 000	13 500	13 500	13 500	5 500	5 500	5 500	40 500
	58 000	13 833	13 833	13 833	5 500	5 500	5 500	41 500
	59 000	13 667	13 667	13 667	6 000	6 000	6 000	41 000
Flöden över 60 000 kräver även mer filter och större FF	60 000	14 000	14 000	14 000	6 000	6 000	6 000	42 000
	61 000	14 333	14 333	14 333	6 000	6 000	6 000	43 000
	62 000	14 667	14 667	14 667	6 000	6 000	6 000	44 000
	63 000	15 000	15 000	15 000	6 000	6 000	6 000	45 000
	64 000	15 333	15 333	15 333	6 000	6 000	6 000	46 000
	65 000	15 667	15 667	15 667	6 000	6 000	6 000	47 000
	66 000	15 500	15 500	15 500	6 500	6 500	6 500	46 500
	67 000	15 833	15 833	15 833	6 500	6 500	6 500	47 500
	68 000	15 667	15 667	15 667	7 000	7 000	7 000	47 000
	69 000	16 000	16 000	16 000	7 000	7 000	7 000	48 000
	70 000	15 833	15 833	15 833	7 500	7 500	7 500	47 500
	71 000	15 667	15 667	15 667	8 000	8 000	8 000	47 000
	72 000	15 500	15 500	15 500	8 500	8 500	8 500	46 500
	73 000	15 333	15 333	15 333	9 000	9 000	9 000	46 000
	74 000	15 667	15 667	15 667	9 000	9 000	9 000	47 000



Figur 1 Optimal körning av 3 stycken HST40 (Wh/m³ på Y-axeln, Nm³/h på X-axeln).



Figur 2 Driftkurva för HST40.



Figur 3 Driftkurva för HST 9000.

Tabell 3 Varaktighet och antal blåsmaskiner (från Sulzers anbud).

Flöde	Timmar	Effekt (kw)	kWh	Wh/m3	Antal maskiner	HST40 (Nr:1)	HST 40 (Nr:2)	HST 40 (Nr:3)	HST 9000 (Nr:1)
10000	3	153,8	461,4	15,4	1	10000			
11000	39	170,4	6 645,6	15,5	1	11000			
12000	55	188,9	10 389,5	15,7	1	12000			
13000	88	208,7	18 365,6	16,1	1	13000			
14000	116	224,8	26 076,8	16,1	2	7000	7000		
15000	191	237,4	45 343,4	15,8	2	7500	7500		
16000	356	249,8	88 928,8	15,6	2	8000	8000		
17000	519	263,2	136 600,8	15,5	2	8500	8500		
18000	754	276,8	208 707,2	15,4	2	9000	9000		
19000	1086	291,2	316 243,2	15,3	2	9500	9500		
20000	1372	307,6	422 027,2	15,4	2	10000	10000		
21000	1556	323,8	503 832,8	15,4	2	10500	10500		
22000	1812	340,6	617 167,2	15,5	2	11000	11000		
23000	1953	359,2	701 517,6	15,6	2	11500	11500		
24000	2018	374,7	756 144,6	15,6	2	8000	8000	8000	
25000	2020	388,1	783 962,0	15,5	2	8500	8500	8000	
26000	1846	401,6	741 353,6	15,4	2	9000	8500	8500	
27000	1686	415,2	700 027,2	15,4	3	9000	9000	9000	
28000	1477	429,6	634 519,2	15,3	3	9500	9500	9000	
29000	1397	445	621 665,0	15,3	3	10000	9500	9500	
30000	1214	461,4	560 139,6	15,4	3	10000	10000	10000	
31000	1012	477,6	483 331,2	15,4	3	10500	10500	10000	
32000	894	494,1	441 725,4	15,4	3	11000	10500	10500	
33000	719	510,9	367 337,1	15,5	3	11000	11000	11000	
34000	507	529,5	268 456,5	15,6	3	11500	11500	11000	
35000	355	548	194 540,0	15,7	3	12000	11500	11500	
36000	247	566,4	139 900,8	15,7	3	12000	12000	12000	
37000	176	585,2	102 995,2	15,8	3	125000	12500	12000	
38000	120	605,1	72 612,0	15,9	3	13000	12500	12500	
39000	72	626,1	45 079,2	16,1	3	13000	13000	13000	
40000	40	646,9	25 876,0	16,2	3	13500	13500	13000	
41000	23	667,6	15 354,8	16,3	3	14000	13500	13500	
42000	15	688,2	10 323,0	16,4	3	14000	14000	14000	
43000	4	714,2	2 856,8	16,6	3	14500	14500	14000	
47000	1	830,9	830,9	17,7	3	16000	15500	15500	
49000	1	821,2	821,2	16,8	4	14500	14500	14500	5500
52000	1	904,6	904,6	17,4	4	15500	15500	15500	5500

APPENDIX B

```

%Styrstrategi endast nya maskiner

clear all
close all
clc
s = 10000; % antal körningar i i-loopen (antal kombinationer för ett visst
totalflöde som undersöks)
Qmin=5000;
Qmax=17000;

p1 = [-0.000000361408869    0.007384614823531   40.516516945419397]; %polynom som
beräknar effektivitet som funktion av luftflöde Q

%Q=10000; %ska göras for-loop för flöden mellan 5000 - maxflöde
Q = linspace(5000,45000,100);

for j = 1:length(Q)
    for i=1:s

        Q1(i,j)=Qmin+rand*(Qmax-Qmin);

        Qhelp1=Q(j)-Q1(i,j); %räknar ut ifall första blåsmaskinen uppfyller
luftningsbehovet eller om det behövs sättas in en till

        if (Qhelp1<Qmin)
            Q1(i,j)=Q1(i,j)+Qhelp1;
            Qhelp1=0;
        end

        Q2(i,j)=Qmin+rand*(Qhelp1-Qmin);

        Qhelp2=Q(j)-Q1(i,j)-Q2(i,j);

        if (Qhelp2<Qmin)
            Q2(i,j)=Q2(i,j)+Qhelp2;
            Qhelp2=0;
        end
        if Qhelp2 > 0
            Q3(i,j)=Q(j)-Q1(i,j)-Q2(i,j);
        else
            Q3(i,j) = 0;
        end
        Qtest(i,j)=Q1(i,j)+Q2(i,j)+Q3(i,j);

        effektivitet(i,j)=(Q1(i,j)*polyval(p1,Q1(i,j))
+Q2(i,j)*polyval(p1,Q2(i,j))+Q3(i,j)*polyval(p1,Q3(i,j)))/(Q1(i,j)+Q2(i,j)
+Q3(i,j));

    end
    [a1,a2]=sort(effektivitet(:,j)); %sorterar från lägsta till högsta värde på
effektivitet (a1) för aktuellt flöde (a2)
    %OPT(i,j) = [Q1(a2(end)) Q2(a2(end)) Q3(a2(end))]

    optQ1=Q1(a2(end),j); %flöde för Q1 som ger max effektivitet
    optQ2=Q2(a2(end),j);
    optQ3=Q3(a2(end),j);

    OPTQn(j,1) = optQ1;
    OPTQn(j,2) = optQ2;
    OPTQn(j,3) = optQ3;
end
figure
plot(Q,OPTQn(:,1))
hold on
plot(Q,OPTQn(:,2))
plot(Q,OPTQn(:,3))
ylim([0 16000])
xlabel('Totalt luftflöde [m3/h]')
ylabel('Luftflöde per maskin [m3/h]')

```

```
title('Modellerad optimal styrstrategi för HST40')  
legend('HST40 1', 'HST40 2', 'HST40 3')
```

```

% styrning bara gamla maskiner

clear all
close all
clc
s = 10000; % antal körningar i i-loopen (antal kombinationer för ett visst
totalflöde som undersöks)
Qmin = 3500; %minflöde hst9000 (gamla)
Qmax = 9000; %maxflöde hst9000

p2 = [-0.000000787412577    0.009975889593502   38.884574826673557]; %polynom som
beräknar verkningsgraden för gamla maskiner som funktion av luftflöde Q gamla
maskiner

Q = linspace(3500,27000,40); % eg linspace(3500,27000,100)

for j = 1:length(Q) %eg 1:length(Q)
    for i=1:s

        Q1(i,j)=Qmin+rand*(Qmax-Qmin);

        Qhelp1=Q(j)-Q1(i,j); %räknar ut ifall första blåsmaskinen uppfyller
luftningsbehovet eller om det behövs sättas in en till

        if (Qhelp1<Qmin)
            Q1(i,j)=Q1(i,j)+Qhelp1;
            Qhelp1=0;
        end

        Q2(i,j)=Qmin+rand*(Qhelp1-Qmin);

        Qhelp2=Q(j)-Q1(i,j)-Q2(i,j);

        if (Qhelp2<Qmin)
            Q2(i,j)=Q2(i,j)+Qhelp2;
            Qhelp2=0;
        end
        if Qhelp2 > 0
            Q3(i,j)=Q(j)-Q1(i,j)-Q2(i,j);
        else
            Q3(i,j) = 0;
        end
        Qtest(i,j)=Q1(i,j)+Q2(i,j)+Q3(i,j);

        effektivitet(i,j)=(Q1(i,j)*polyval(p2,Q1(i,j))
+Q2(i,j)*polyval(p2,Q2(i,j))+Q3(i,j)*polyval(p2,Q3(i,j)))/(Q1(i,j)+Q2(i,j)
+Q3(i,j));

    end
    [a1,a2]=sort(effektivitet(:,j)); %sorterar från lägsta till högsta värde på
effektivitet (a1) för aktuellt flöde (a2)
    %OPT(i,j) = [Q1(a2(end)) Q2(a2(end)) Q3(a2(end))]

    optQ1=Q1(a2(end),j); %flöde för Q1 som ger max effektivitet
    optQ2=Q2(a2(end),j);
    optQ3=Q3(a2(end),j);

    OPTQg(j,1) = optQ1;
    OPTQg(j,2) = optQ2;
    OPTQg(j,3) = optQ3;
end

figure
plot(Q,OPTQg(:,1),'m')
hold on
plot(Q,OPTQg(:,2),'g')
plot(Q,OPTQg(:,3),'c')
xlim([3500 27000])

```

```
xlabel('Totalt luftflöde [m3/h]')
ylabel('Luftflöde per maskin [m3/h]')
title('Modellerad optimal styrstrategi för HST9000')
legend('HST9000 1', 'HST9000 2', 'HST9000 3')
```

```

% Modellbygge för effektberäkningar. Framtagande av
% proportionalitetskonstant med MK-metoden mm.

% timdata from 16-Dec-2016 01:59:59 tom 29-Mar-2017 13:00:00
% Luftflöden [Nm3/h] från blåsmaskiner 3, 5 och 6 (nya). Effektförbrukning för
% samtliga maskiner [kW]. Utstyrning [%] för gamla maskiner 1, 2 och 4.
% q1, q2 osv = luftflöden från respektive blåsmaskin. Luftflödet för de gamla
% maskinerna måste dock beräknas.
% w1, w2 osv är effektförbrukningen för varje maskin [kW]. Data finns
% tillgängligt för alla maskiner

load 20170329_bmdata

%% ta bort alla nan
q1(isnan(q1))= 0;
q2(isnan(q2))=0;
q3(isnan(q3))= 0;
q4(isnan(q4))=0;
q5(isnan(q5))= 0;
q6(isnan(q6))=0;

w1(isnan(w1))= 0;
w2(isnan(w2))=0;
w3(isnan(w3))= 0;
w4(isnan(w4))=0;
w5(isnan(w5))= 0;
w6(isnan(w6))=0;
%% Sätt negativa värden till 0

for i = 1:length(ut1)
    if ut1(i) < 0
        ut1(i) = 0;
    end
    if ut2(i) < 0
        ut2(i) = 0;
    end
    if ut4(i) < 0
        ut4(i) = 0;
    end
end

end

Qmax = 9000; %maximal kapacitet för gamla maskiner hst9000

q1_test = ut1.*Qmax*0.01; %finns ej flödesmätningar för gamla maskiner (1,2,4)
så approximeras enl ekv
q2_test = ut2.*Qmax*0.01;
q4_test = ut4.*Qmax*0.01;

%% Beräkna teoretisk effektförbrukning för maskinerna

% P = Q/n
% vi har n(Q) (polynomen)

% total effektförbrukning (verklig) Pv

Pv = w1 + w2 + w3 + w4 + w5 + w6;
figure(2)
plot(Tid, Pv);
title('Uppmätt och beräknad effektförbrukning för blåsmaskinerna')
hold on
% tot effektförbrukning (teori) Pt

p1 = [-0.000000361408869    0.007384614823531   40.516516945419397]; %polynom som
beräknar verkningsgrad som funktion av luftflöde Q nya maskiner
p2 = [-0.000000787412577    0.009975889593502   38.884574826673557]; %polynom som
beräknar verkningsgrad som funktion av luftflöde Q gamla maskiner

% teoretisk effektförbrukning Pt

```

```

for i = 1:length(q1_test)

    Pt1 = q1_test./polyval(p2,q1_test);
    Pt2 = q2_test./polyval(p2, q2_test);
    Pt3 = q3./polyval(p1, q3);
    Pt4 = q4_test./polyval(p2, q4_test);
    Pt5 = q5./polyval(p1, q5);
    Pt6 = q6./polyval(p1, q6);

end

%% Ta bort mera NaN

Pt1(isnan(Pt1))= 0;
Pt2(isnan(Pt2))= 0;
Pt3(isnan(Pt3))= 0;
Pt4(isnan(Pt4))= 0;
Pt5(isnan(Pt5))= 0;
Pt6(isnan(Pt6))= 0;

%%

Pt = Pt1 + Pt2 + Pt3 + Pt4 + Pt5 + Pt6;

P_kal = Pt\Pv; %MK-metod, P_kal = proportionalitetskonstant
% P_kal(isnan(P_kal))= [];

Ptkal = Pt*P_kal; %Beräknar Pmodell
%plot(Tid, Pt, 'r') Bara om man vill ha med mellansteget utan k
plot(Tid, Ptkal, 'g')

xlabel('Tid')
ylabel('Effektförbrukning [kW]')
legend('Uppmätt effektförbrukning', 'Modellerad effektförbrukning (P_{modell})')
%legend('Uppmätt effektförbrukning', 'Teoretisk effektförbrukning', 'Teoretisk
kalibrerad effektförbrukning')

%% Hur bra är modelleringen?
Pv_avg = mean(Pv);

FIT = 1 - (norm(Pv - Ptkal))/(norm(Pv-Pv_avg))

```



```

%jämför effektförbrukning för (enbart) nya maskiner och driftdata

clear all
close all
clc
load 20170329_bmdata.mat
s = 1000; % antal körningar i i-loopen (antal kombinationer för ett visst
totalflöde som undersöks)
Qmin=5000;
Qmax=17000;

p1 = [-0.000000361408869    0.007384614823531   40.516516945419397]; %polynom som
beräknar effektivitet som funktion av luftflöde Q
p2 = [-0.000000787412577    0.009975889593502   38.884574826673557]; %polynom som
beräknar verkningsgraden för gamla maskiner som funktion av luftflöde Q gamla
maskiner

%Q=10000; %ska göras for-loop för flöden mellan 5000 - maxflöde
Q = linspace(5000,51000,100); %konstruerat totalt luftflödesbehov 43000 innan

for j = 1:length(Q)
    for i=1:s

        Q1(i,j)=Qmin+rand*(Qmax-Qmin);

        Qhelp1=Q(j)-Q1(i,j); %räknar ut ifall första blåsmaskinen uppfyller
luftningsbehovet eller om det behövs sättas in en till

        if (Qhelp1<Qmin)
            Q1(i,j)=Q1(i,j)+Qhelp1;
            Qhelp1=0;
        end

        Q2(i,j)=Qmin+rand*(Qhelp1-Qmin);

        Qhelp2=Q(j)-Q1(i,j)-Q2(i,j);

        if (Qhelp2<Qmin)
            Q2(i,j)=Q2(i,j)+Qhelp2;
            Qhelp2=0;
        end
        if Qhelp2 > 0
            Q3(i,j)=Q(j)-Q1(i,j)-Q2(i,j);
        else
            Q3(i,j) = 0;
        end
        Qtest(i,j)=Q1(i,j)+Q2(i,j)+Q3(i,j);

        effektivitet(i,j)=(Q1(i,j)*polyval(p1,Q1(i,j))
+Q2(i,j)*polyval(p1,Q2(i,j))+Q3(i,j)*polyval(p1,Q3(i,j)))/(Q1(i,j)+Q2(i,j)
+Q3(i,j));

    end
    [a1,a2]=sort(effektivitet(:,j)); %sorterar från lägsta till högsta värde på
effektivitet (a1) för aktuellt flöde (a2)
    %OPT(i,j) = [Q1(a2(end)) Q2(a2(end)) Q3(a2(end))]

    optQ1=Q1(a2(end),j); %flöde för Q1 som ger max effektivitet
    optQ2=Q2(a2(end),j);
    optQ3=Q3(a2(end),j);

    OPTQ(j,1) = optQ1;
    OPTQ(j,2) = optQ2;
    OPTQ(j,3) = optQ3;
end

figure(1)

plot(Q,OPTQ(:,1))
hold on

```

```

plot(Q,OPTQ(:,2))
% plot(Q,OPTQ(:,3))

%% Beräkna effektförbrukning P

n1 = polyval(p1,OPTQ(:,1));
n2 = polyval(p1,OPTQ(:,2));
n3 = polyval(p1,OPTQ(:,3));

k = 1.3029; %framtaget med MK-metoden i scriptet "jmf"
P = k*((OPTQ(:,1)./n1) + (OPTQ(:,2)./n2) + (OPTQ(:,3)./n3));

plotyy(Q,OPTQ(:,3),Q,P,'plot')
title('Styrstrategi med uträknad effektförbrukning')
xlabel('Totalt luftflöde [m3/h]')
ylabel('Luftflöde per blåsmaskin [m3/h]')
legend('Blåsmaskin 1','Blåsmaskin 2','Blåsmaskin 3','Effektförbrukning')

%% Jämför med driftdata 16-Dec-2016 01:59:59 tom 29-Mar-2017 13:00:00

w1(isnan(w1))= 0; %ta bort alla NaN
w2(isnan(w2))=0;
w3(isnan(w3))= 0;
w4(isnan(w4))=0;
w5(isnan(w5))= 0;
w6(isnan(w6))=0;

w_alla = [w1 w2 w3 w4 w5 w6]; %alla effektdata i samma matris

%% ta bort alla nan
q1(isnan(q1))= 0;
q2(isnan(q2))=0;
q3(isnan(q3))= 0;
q4(isnan(q4))=0;
q5(isnan(q5))= 0;
q6(isnan(q6))=0;

%% Sätt negativa värden till 0
for i = 1:length(ut1)
    if ut1(i) < 0
        ut1(i) = 0;
    end
    if ut2(i) < 0
        ut2(i) = 0;
    end
    if ut4(i) < 0
        ut4(i) = 0;
    end
end

Qmax = 9000; %maximal kapacitet för gamla maskiner hst9000

% kom ihåg att qmin = 3500, vissa flöden understiger detta. Åtgärd?
q1_test = ut1.*Qmax*0.01; %finns ej flödesmätningar för gamla maskiner (1,2,4)
så approximeras enl ekv
q2_test = ut2.*Qmax*0.01;
q4_test = ut4.*Qmax*0.01;

q_tot = q1_test + q2_test + q3 + q4_test + q5 + q6; %Totala VERKLIGA/uppmätta
luftflödet

antal_i_drift = sum(w_alla>10,2); %hur många blåsmaskiner är igång
w_tot = w1 + w2 + w3 +w4 +w5 +w6;

figure(2)
subplot(4,1,1)
plot(Tid, antal_i_drift)
xlabel('Tid')
ylabel('antal blåsmaskiner i drift')
title('Antal blåsmaskiner i drift för driftdata 16/12-29/3')

```

```

subplot(4,1,2)
plot(Tid, w_tot)
xlabel('Tid')
ylabel('Total effektförbrukning [kW]')
title('Effektförbrukning för driftdata 16/12-29/3')
subplot(4,1,3)
plot(Tid, q_tot)
xlabel('Tid')
ylabel('Totalt luftflöde')
title('Luftflöde för driftdata 16/12-29/3')

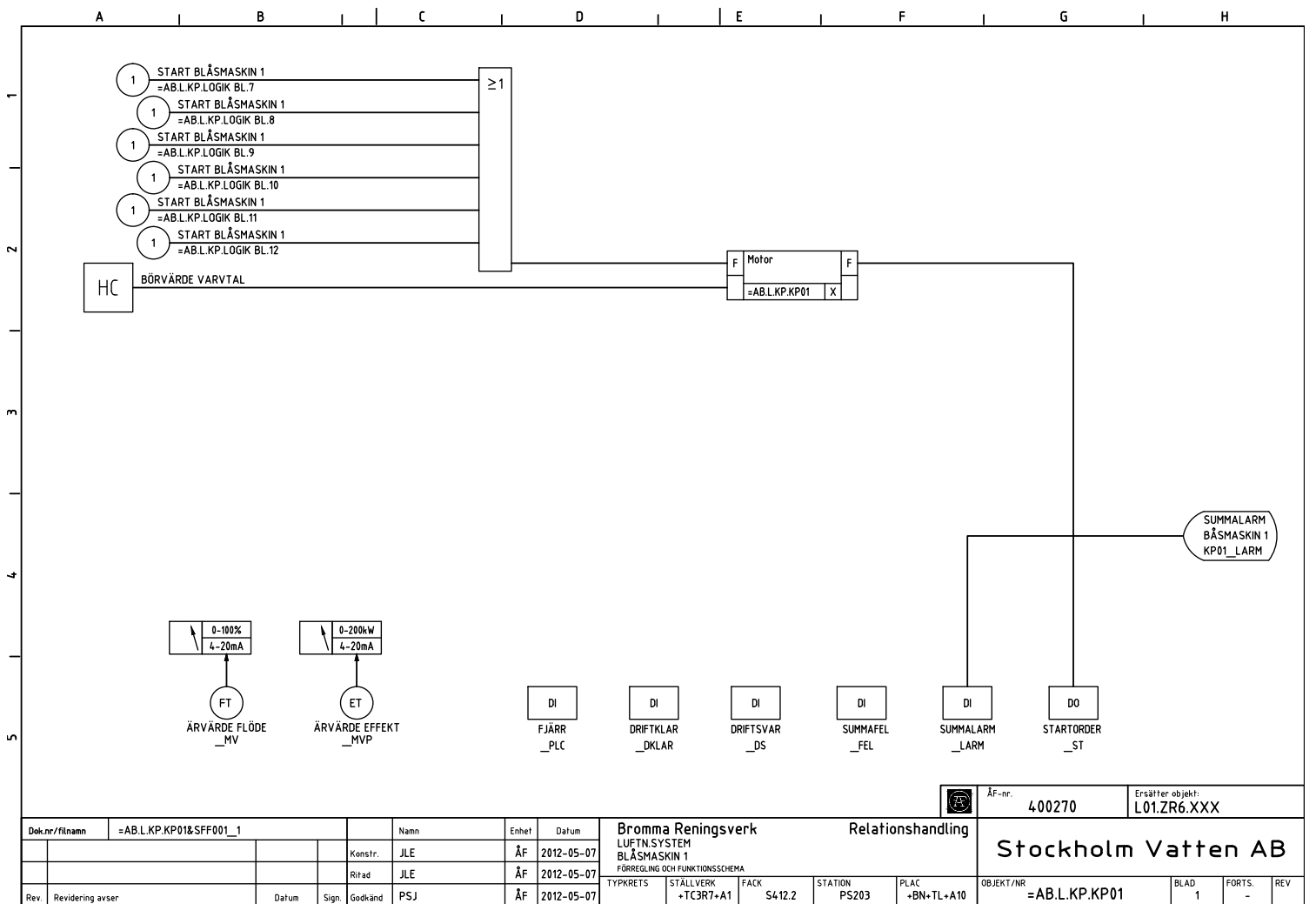
q_tots = sort(q_tot);
w_tots = sort(w_tot);

subplot(4,1,4)
plot(q_tots, w_tots)
xlabel('Totalt luftflöde')
ylabel('Total effektförbrukning')
title('effektförbrukning som fkn av tot luftflöde')

figure(3)
plot(q_tots, w_tots)
hold on
plot(Q,P)
title('Simulerad effektförbrukning och uppmätt effektförbrukning')
xlabel('Totalt luftflöde [Nm3/h]')
ylabel('Total effektförbrukning [kW]')
legend('Simulerad effektförbrukning','Uppmätt effektförbrukning')
xlim([0 46500])

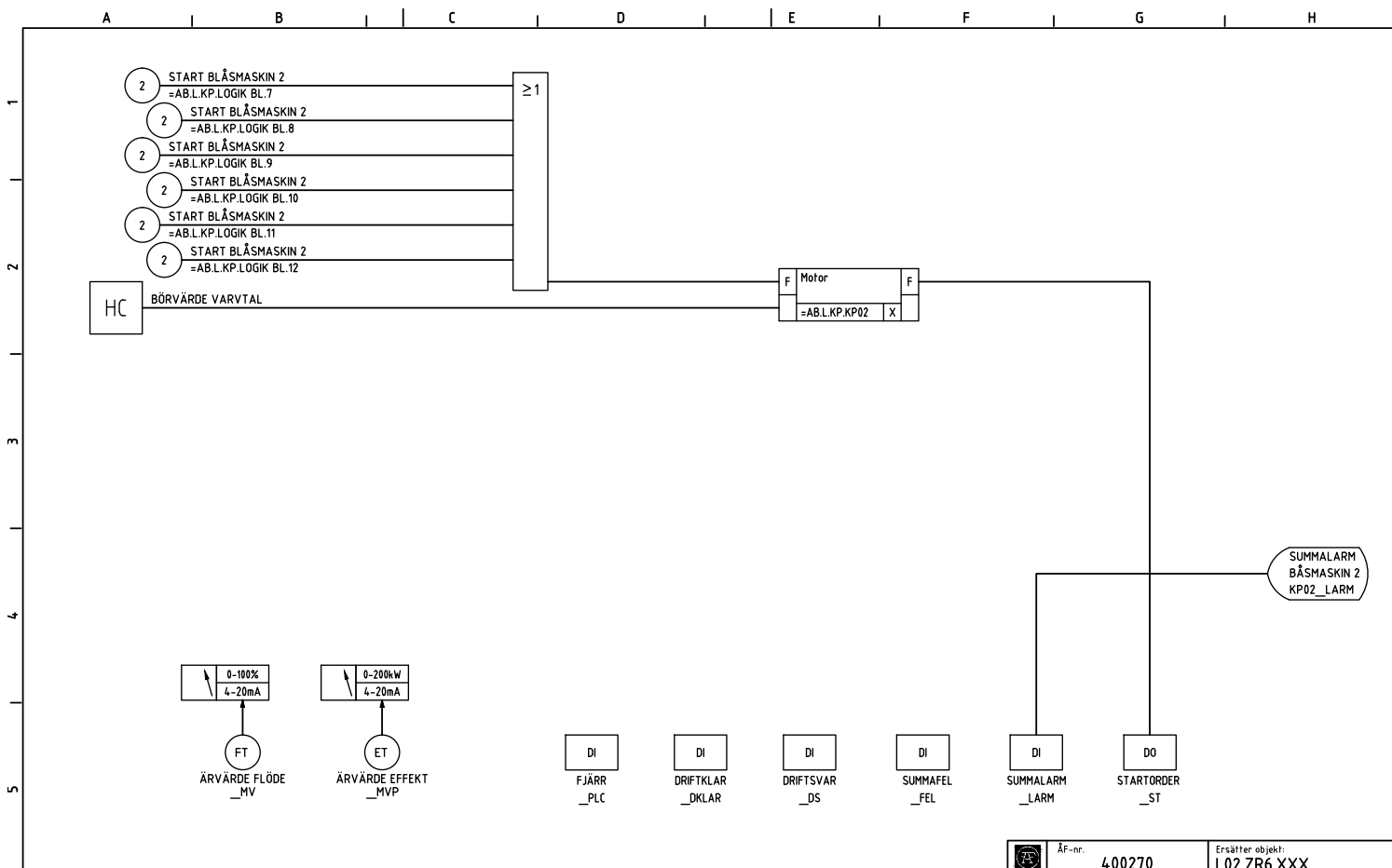
```

APPENDIX C

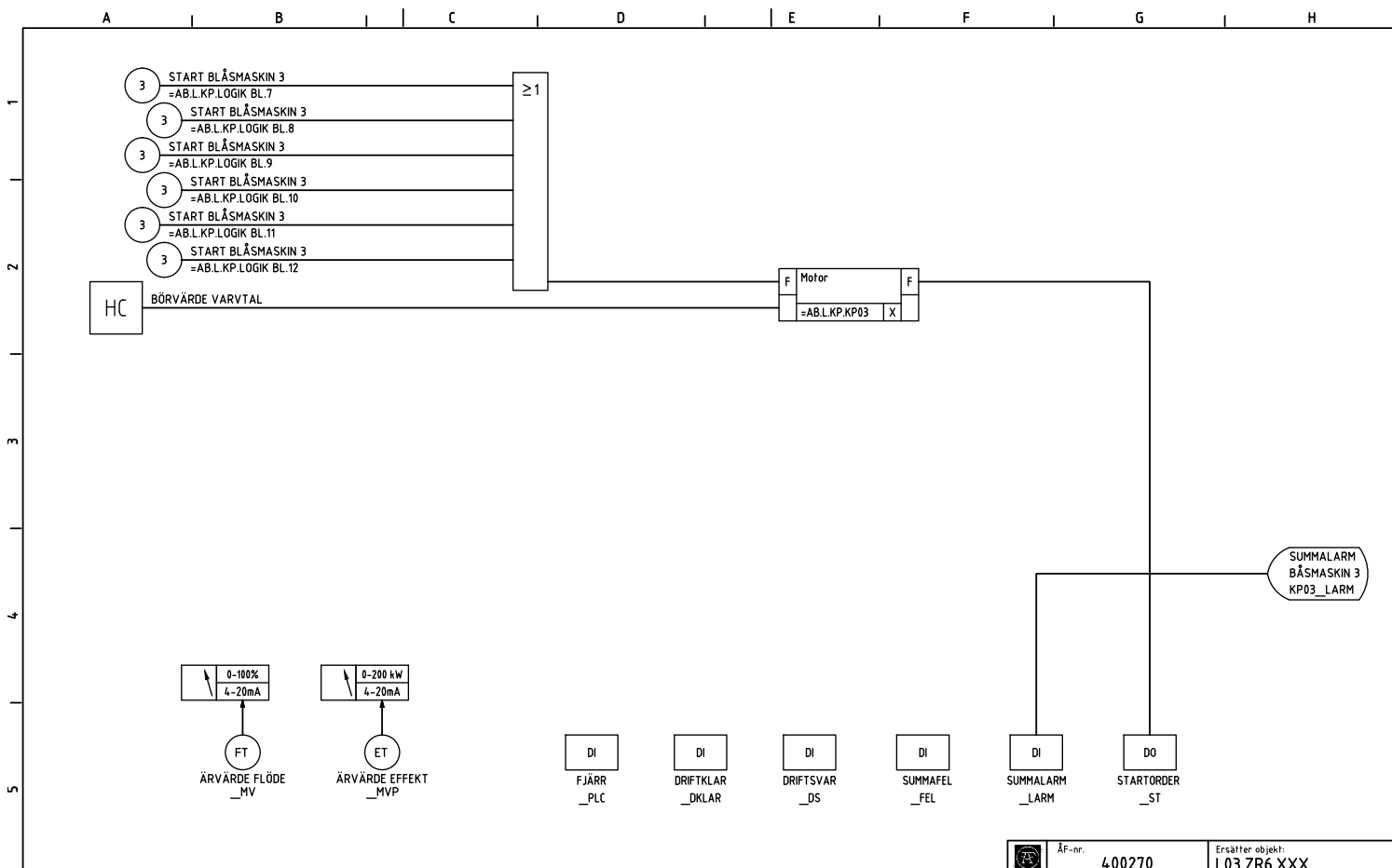


ÅF-nr: 400270 Ersätter objekt: L01.ZR6.XXX

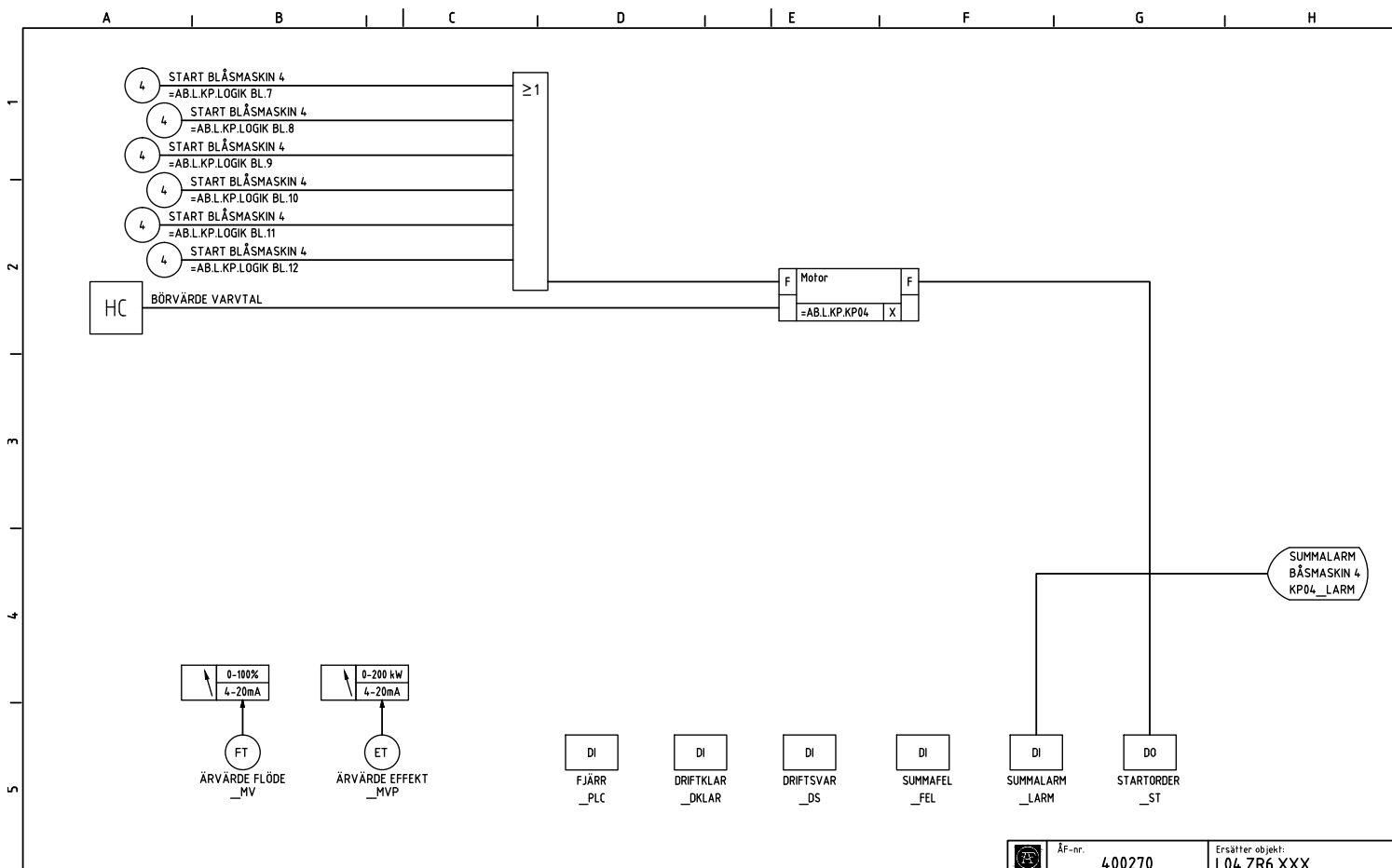
Dok.nr/filnamn		=ABL.KP.KP01&SFF001_1		Namn	Enhet	Datum	Bromma Reningsverk			Relationshandling		Stockholm Vatten AB				
				Konstr.	JLE	ÅF	LUEFTNSYSTEM									
				Ritad	JLE	ÅF	BLÅSMASKIN 1									
Rev.		Revidering avser		Datum	Sign.	Godkänd	TYPKRETETS			STATION		OBJEKT / NR		BLAD	FÖRTS.	REV
							+TC3R7+A1			PS203		=ABL.KP.KP01		1	-	
							S4.12.2			PLAC						
										+BN+TL+A10						



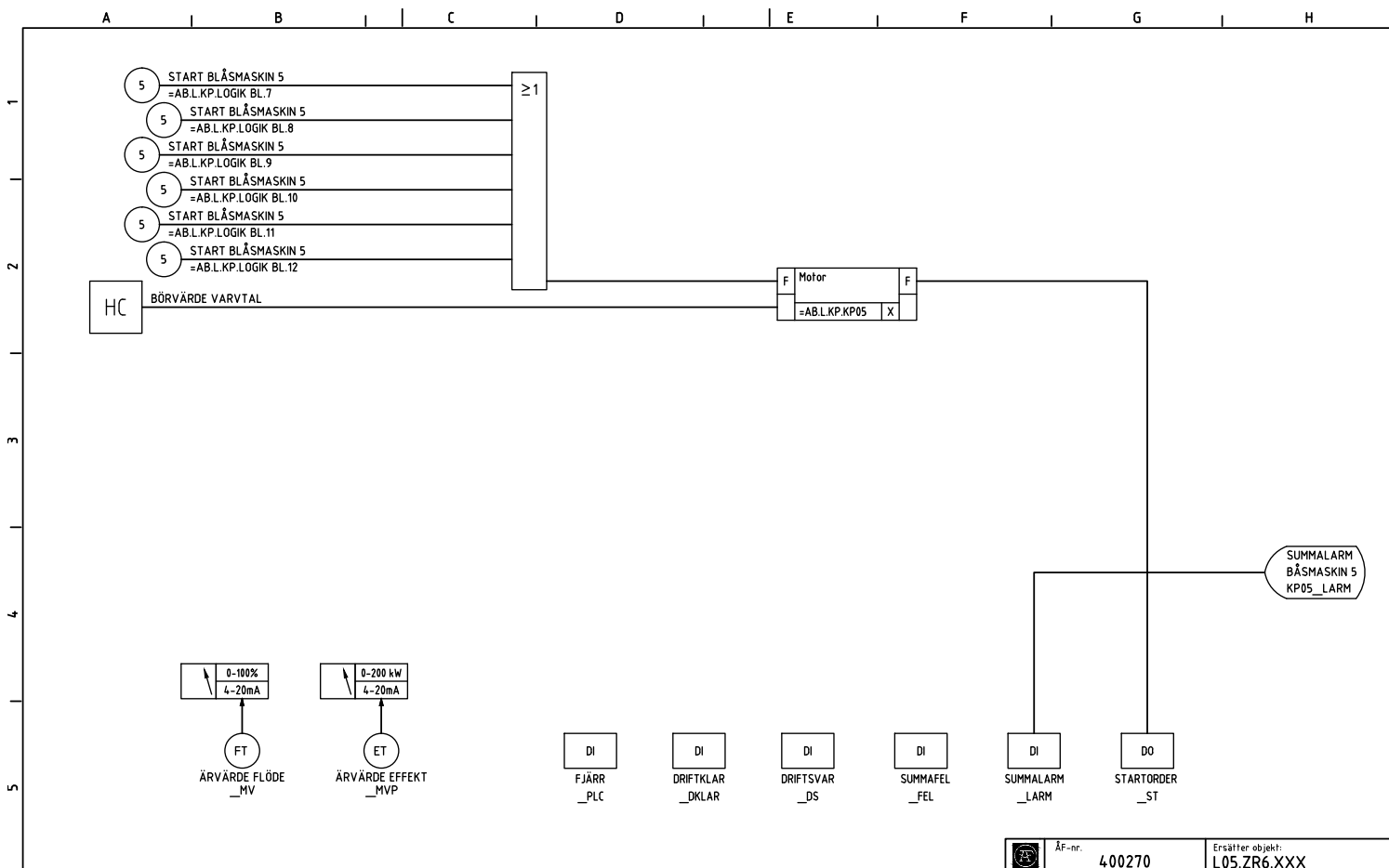
Dok.nr/filnamn		=ABL.KP.KP02&SFF001_1		Namn	Enhet	Datum	Bromma Reningsverk		Relationshandling		ÅF-nr.	Ersätter objekt:				
				Konstr.	JLE	2012-05-07	LUFTHSYSTEM				400270	L02.ZR6.XXX				
				Ritad	JLE	2012-05-07	BLÅSMASKIN 2				Stockholm Vatten AB					
Rev.		Revidering avser	Datum	Sign.	Godkänd	PSJ	2012-05-07	TYPKRETS	STÄLLVERK	FAK	STATION	PLAC	OBJEKT/NR	BLAD	FORTS.	REV
								+TC3R7+A1	S412.3	PS204	+BN+TL+A20	=ABL.KP.KP02	1	-		



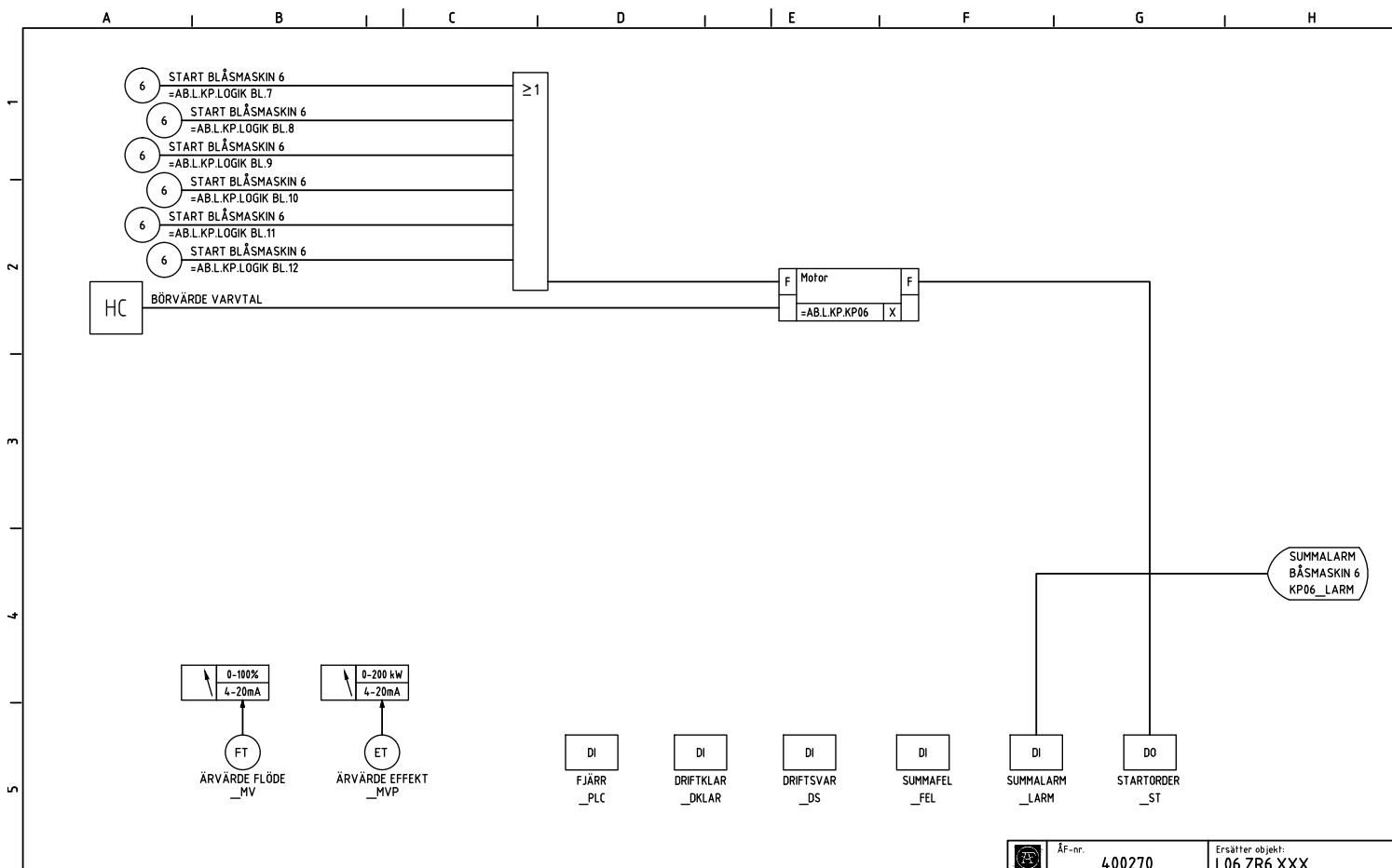
Dok.nr/filnamn		=AB.L.KP.KP03&SFF001_1		Namn	Enhet	Datum	Bromma Reningsverk		Relationshandling		ÅF-nr.	Ersätter objekt:			
				Konstr.	JLE	2012-05-07	LUEFTN.SYSTEM				400270	L03.ZR6.XXX			
				Ritad	JLE	2012-05-07	BLÅSMASKIN 3				Stockholm Vatten AB				
Rev.	Revidering avser	Datum	Sign.	Godkänd	PSJ	2012-05-07	TYPKRETS	STÄLLVERK	FAK	STATION	PLAC	OBJEKT/NR	BLAD	FÖRTS.	REV
							+TC3R7+A1	S413.3	PS203	+BN+TL+A30	=AB.L.KP.KP03	1	-		



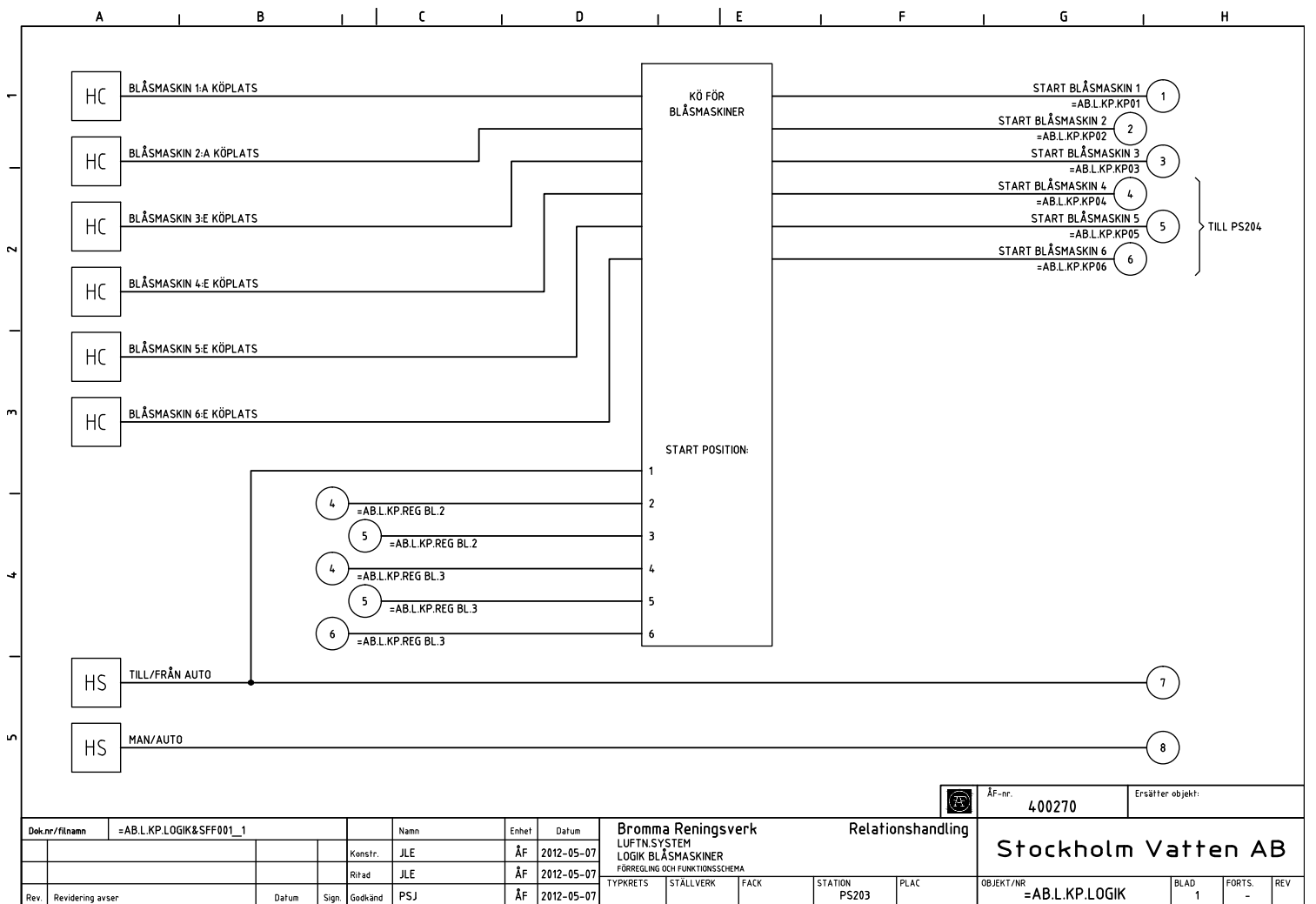
Dok.nr/filnamn =ABL.KP.KP04&SFF001_1		Namn	Enhet	Datum	Bromma Reningsverk LUFTH SYSTEM BLÅSMASKIN 4 FÖRREGLING OCH FUNKTIONSSCHEMA		Relationshandling		ÅF-nr. 400270	Ersätter objekt: L04.ZR6.XXX					
Rev.	Revidering avser	Datum	Sign.	Godkänd	PSJ	ÅF	2012-05-07	TYPKRETS +TC3R7+A6	FAK S512.2	STATION PS204	PLAC +BN+TL+A40	OBJEKT/NR =ABL.KP.KP04	BLAD 1	FÖRTS. -	REV
Stockholm Vatten AB															

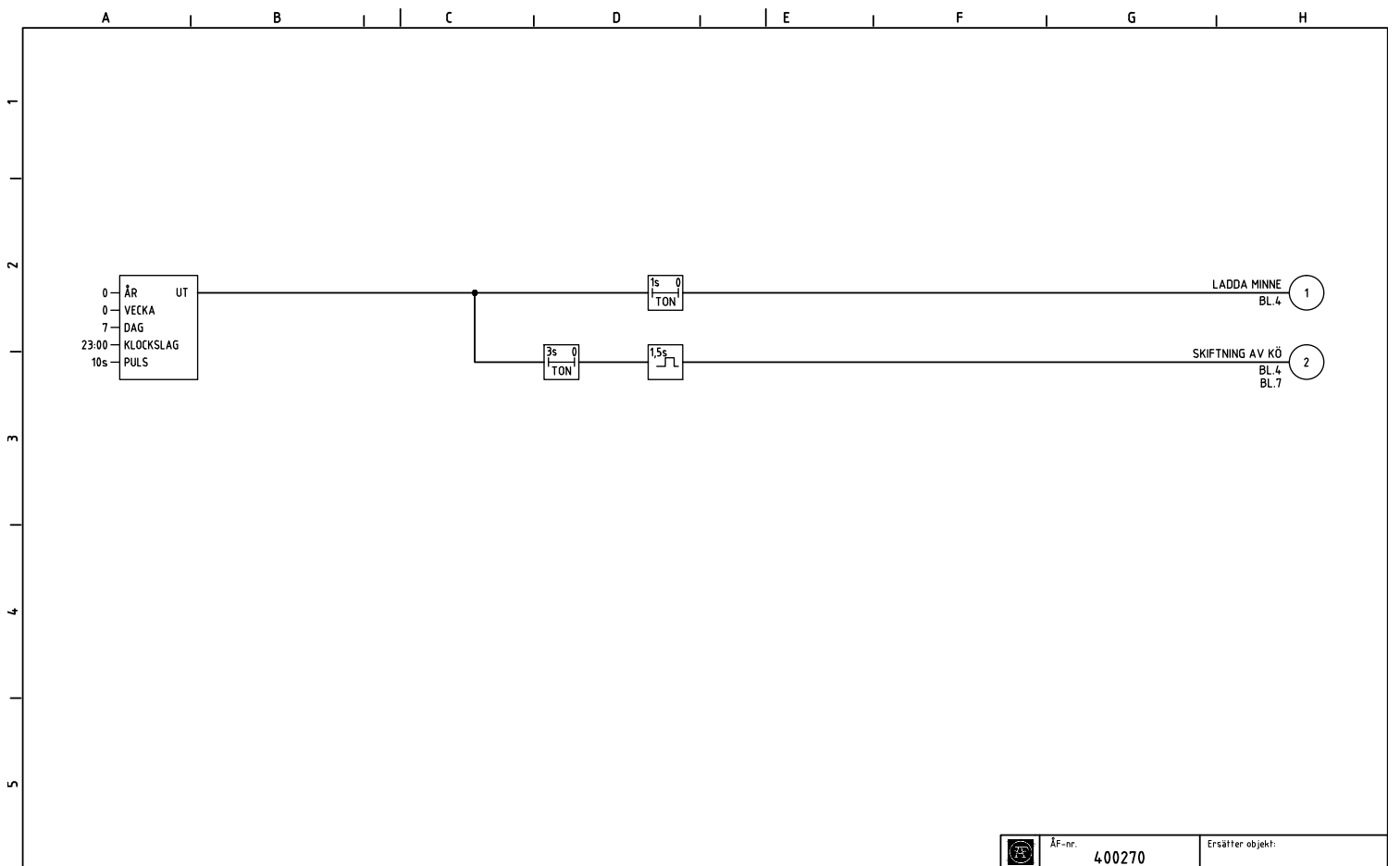


Dok.nr/filnamn		=AB.L.KP.KP05&SFF001_1		Namn	Enhet	Datum	Bromma Reningsverk		Relationshandling		ÅF-nr.	Ersätter objekt:				
				Konstr.	JLE	2012-05-07	LUEFTNSYSTEM				400270	L05.ZR6.XXX				
				Ritad	JLE	2012-05-07	BLÅSMASKIN 5				Stockholm Vatten AB					
Rev.		Revidering avser	Datum	Sign.	Godkänd	PSJ	2012-05-07	TYPKRETS	STÄLLVERK	FAK	STATION	PLAC	OBJEKT/NR	BLAD	FÖRTS.	REV
								+TC3R7+A6	S512.3	PS203	+BN+TL+A50	=AB.L.KP.KP05	1	-		

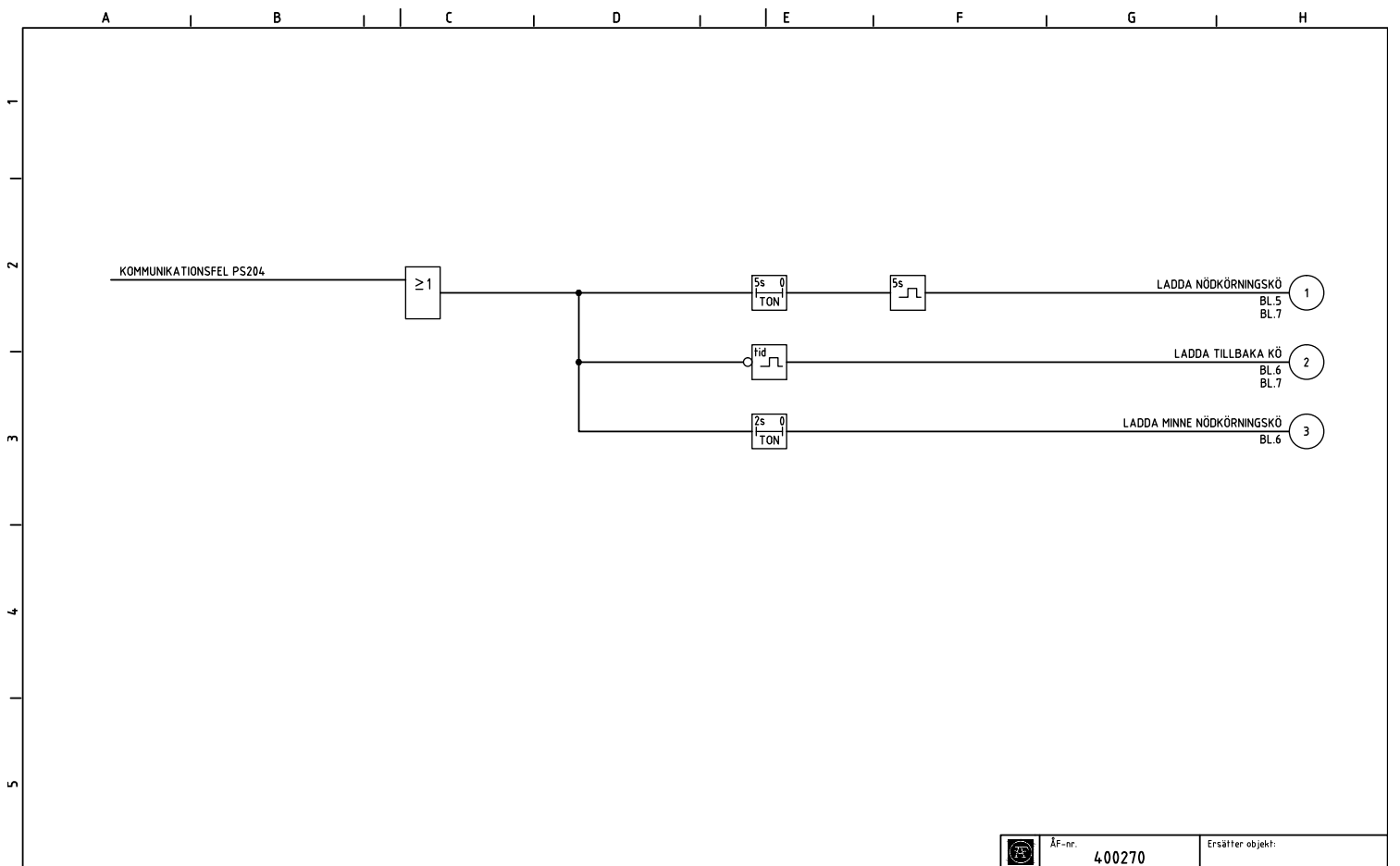


Dok.nr/filnamn		=ABL.KP.KP06&SFF001_1		Namn	Enhet	Datum	Bromma Reningsverk		Relationshandling		ÅF-nr.	Ersätter objekt:				
		Konstr.	JLE	ÅF	2012-05-07	LUEFTNSYSTEM		Stockholm Vatten AB		L06.ZR6.XXX						
		Ritad	JLE	ÅF	2012-05-07	BLÅSMASKIN 6										
Rev.	Revidering avser	Datum	Sign.	Godkänd	PSJ	ÅF	2012-05-07	TYPKRETS	STÄLLVERK	FAK	STATION	PLAC	OBJEKT/NR	BLAD	FORTS.	REV
								+TC3R7+A6	S513.3	PS204	+BN+TL+A60	=ABL.KP.KP06	1	-		

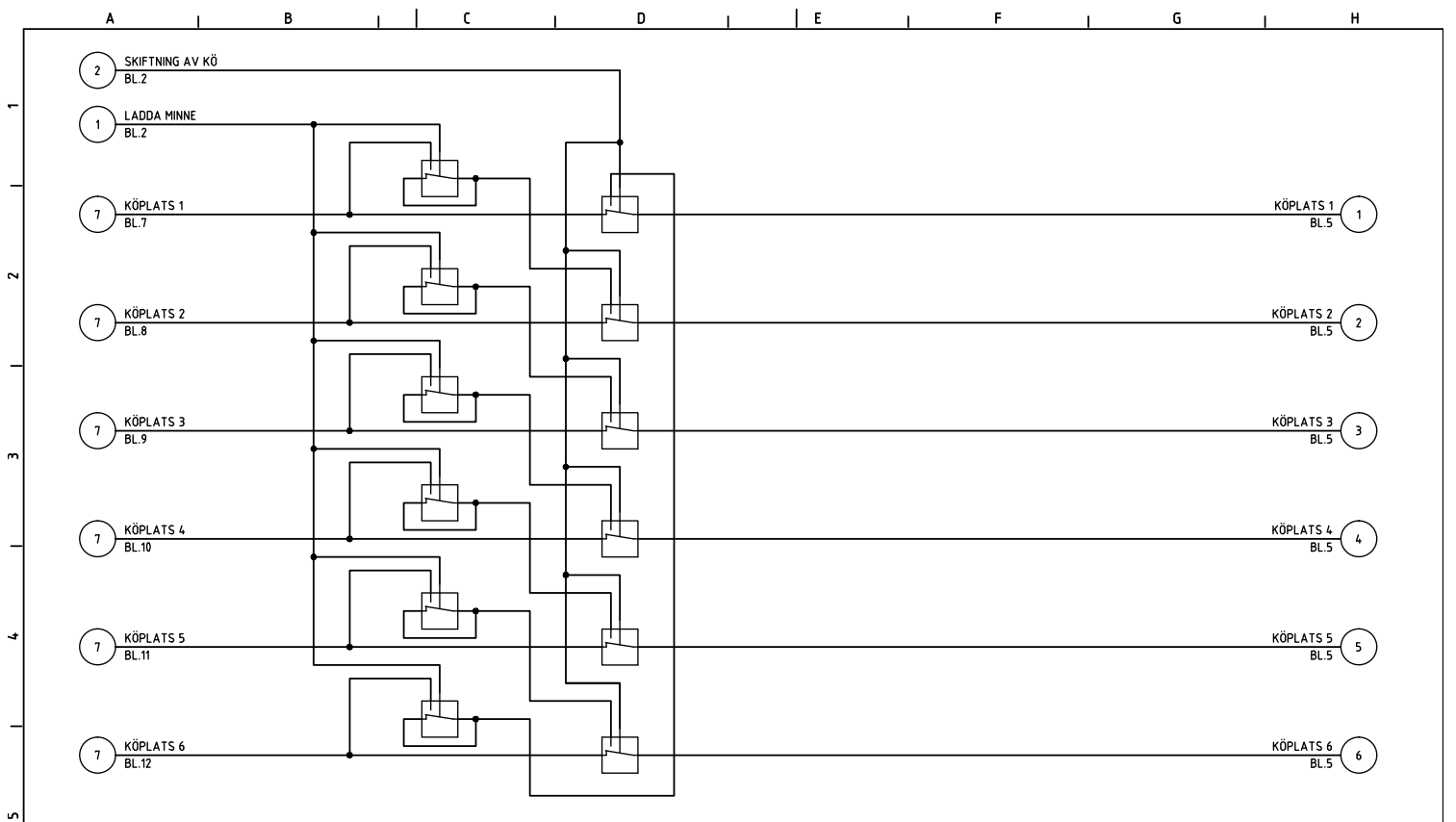




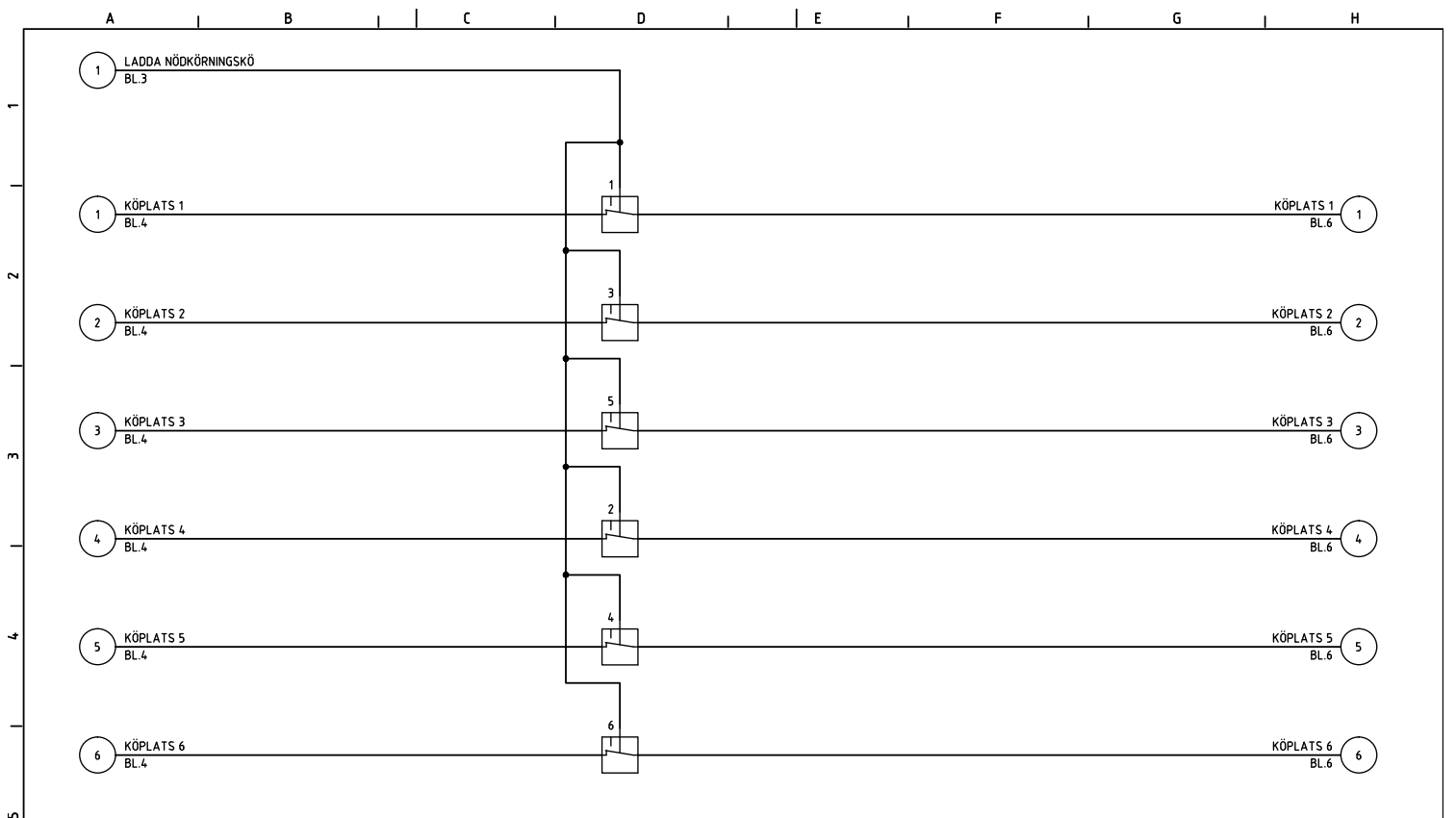
Dok.nr/filnamn		=AB.L.KP.LOGIK&SFF001_2		Namn		Enhet		Datum		Bromma Reningsverk LUFN.SYSTEM LOGIK BLÅSMASKINER FÖRREGLING OCH FUNKTIONSSCHEMA		Relationshandling		ÅF-nr. 400270		Ersätter objekt:							
		Konstr.		JLE		ÅF		2012-05-07						Stockholm Vatten AB									
		Ritad		JLE		ÅF		2012-05-07		TYPKRETS		STÄLLVERK		FACK		STATION PS203		PLAC					
Rev.		Revidering avser		Datum		Sign.		Godkänd		PSJ		ÅF		2012-05-07		OBJEKT/NR =AB.L.KP.LOGIK		BLAD 2		FÖRTS. 3		REV	



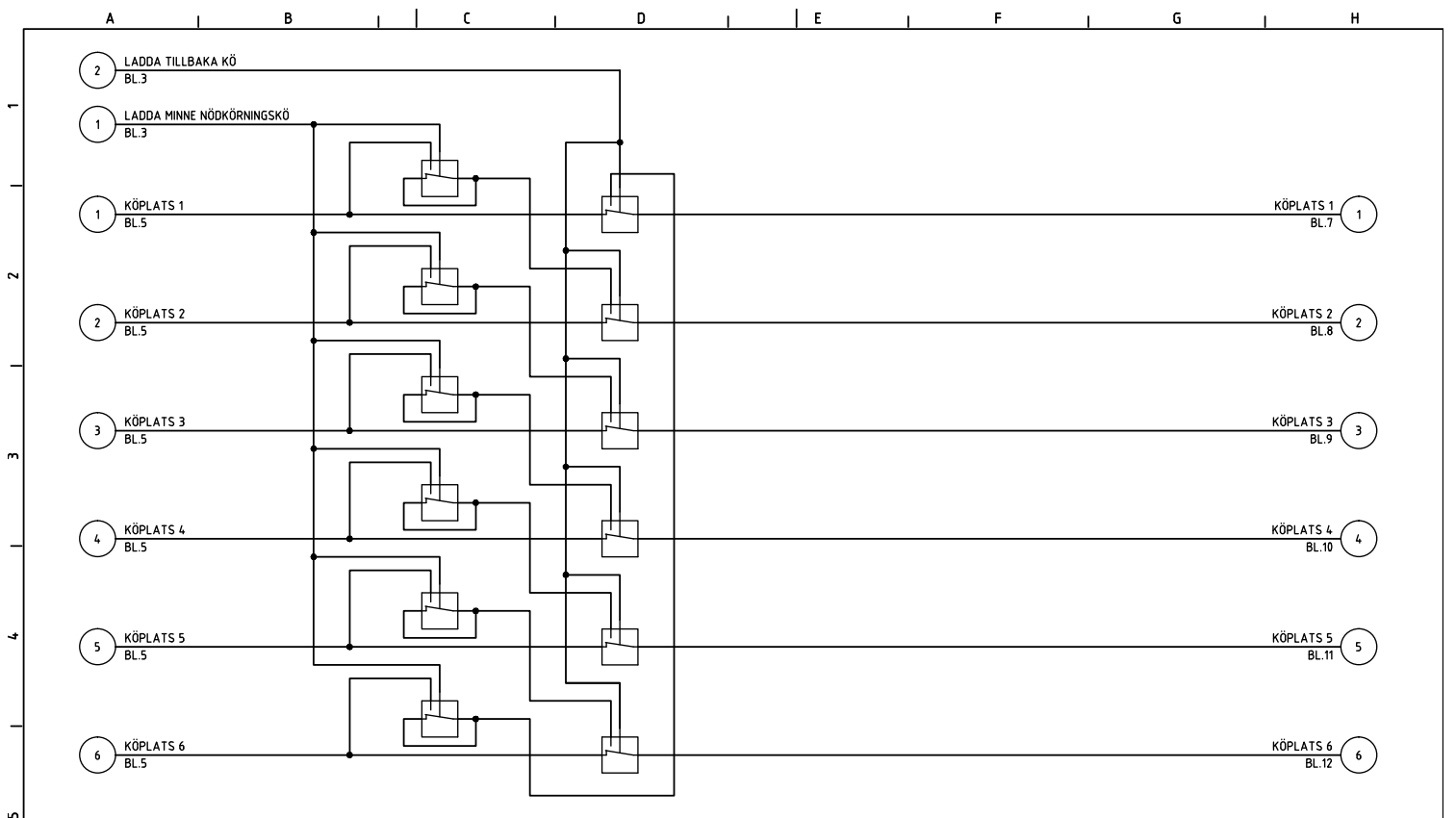
Dok.nr/filnamn		=AB.L.KP.LOGIK&SFF001_3		Namn		Enhet		Datum		Bromma Reningsverk LUFTN.SYSTEM LOGIK BLÅSMASKINER FÖRREGLING OCH FUNKTIONSSCHEMA		Relationshandling		ÅF-nr. 400270		Ersätter objekt:																									
		Konstr.		JLE		ÅF		2012-05-07						Stockholm Vatten AB																											
		Ritad		JLE		ÅF		2012-05-07								OBJEKT/NR		=AB.L.KP.LOGIK																							
Rev.		Revidering avser		Datum		Sign.		Godkänd		PSJ		ÅF		2012-05-07		TYPKRETS		STÄLLVERK		FACK		STATION		PS203		PLAC		OBJEKT/NR		=AB.L.KP.LOGIK		BLAD		3		FÖRTS.		4		REV	



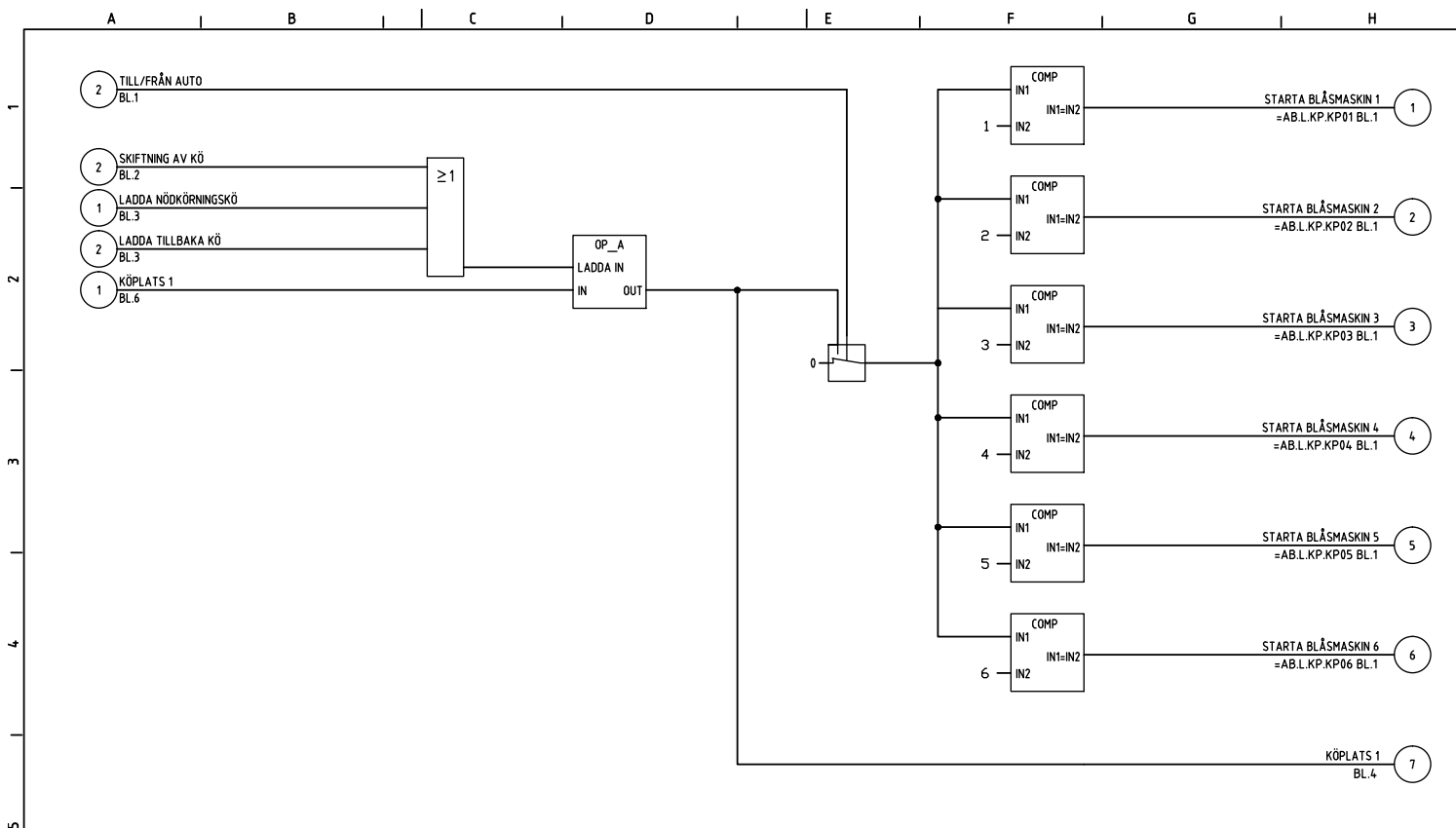
Dok.nr/filnamn =AB.L.KP.LOGIK&SFF001_4				Namn		Enhet		Datum		Relationshandling		ÅF-nr. 400270		Ersätter objekt:																			
				Konstr. JLE		ÅF		2012-05-07		Bromma Reningsverk		Stockholm Vatten AB																					
				Ritad JLE		ÅF		2012-05-07		LUFN.SYSTEM																							
Rev. Revidering avser				Datum		Sign.		Godkänd		PSJ		ÅF		2012-05-07		TYPKRETS		STÄLLVERK		FACK		STATION PS203		PLAC		OBJEKT/NR =AB.L.KP.LOGIK		BLAD 4		FÖRTS. 5		REV	



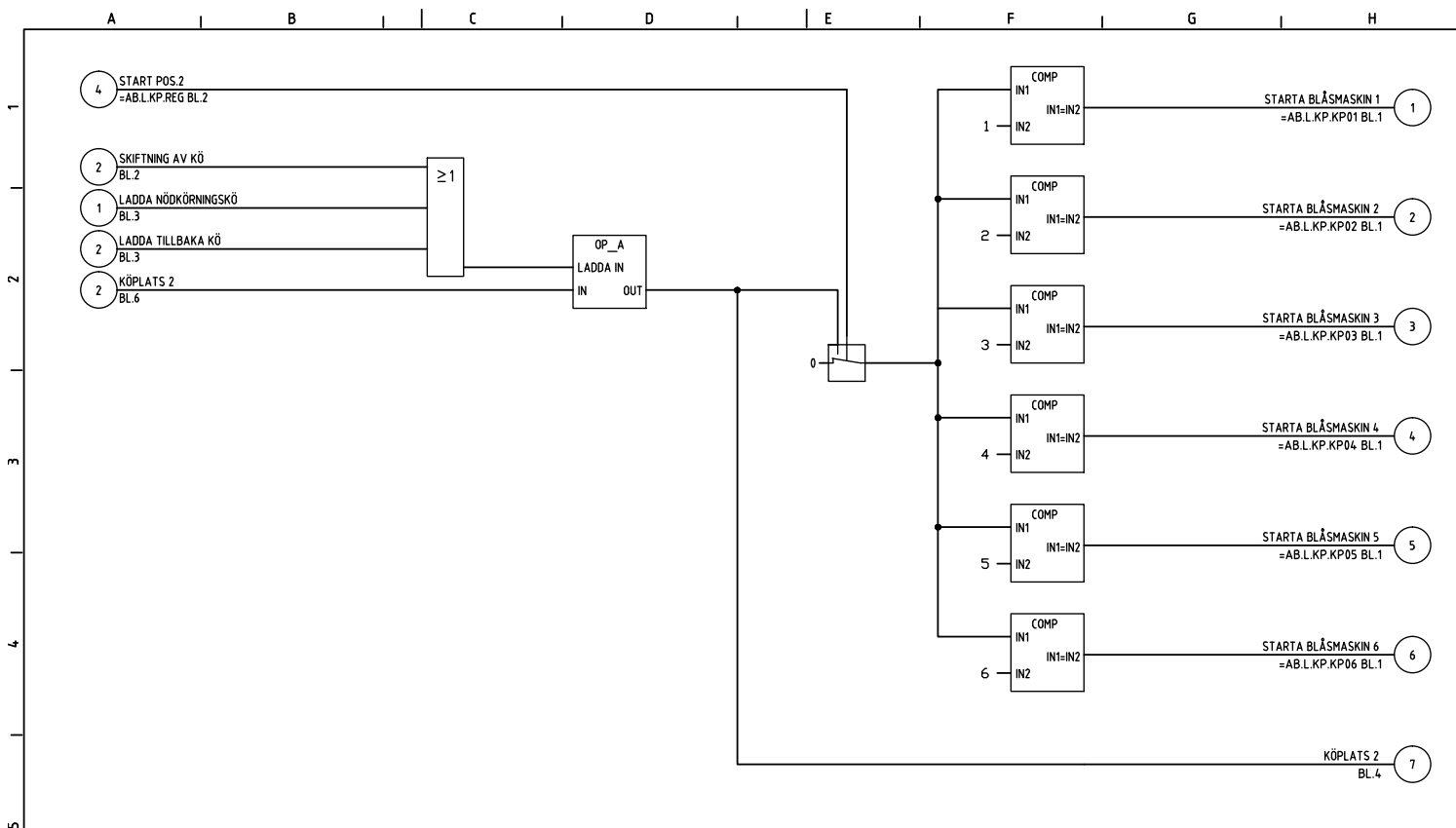
Dok.nr/filnamn =AB.L.KP.LOGIK&SFF001_5				Namn	Enhet	Datum	Bromma Reningsverk LUFTN.SYSTEM LOGIK BLÅSMASKINER FÖRREGLING OCH FUNKTIONSSCHEMA			Relationshandling	ÅF-nr. 400270	Ersätter objekt:			
				Konstr. JLE	ÅF	2012-05-07				Stockholm Vatten AB					
				Ritad JLE	ÅF	2012-05-07	TYPKRETS	STÄLLVERK	FACK	STATION PS203	PLAC	OBJEKT/NR =AB.L.KP.LOGIK	BLAD 5	FÖRTS. 6	REV
Rev.	Revidering avser	Datum	Sign.	Godkänd PSJ	ÅF	2012-05-07									



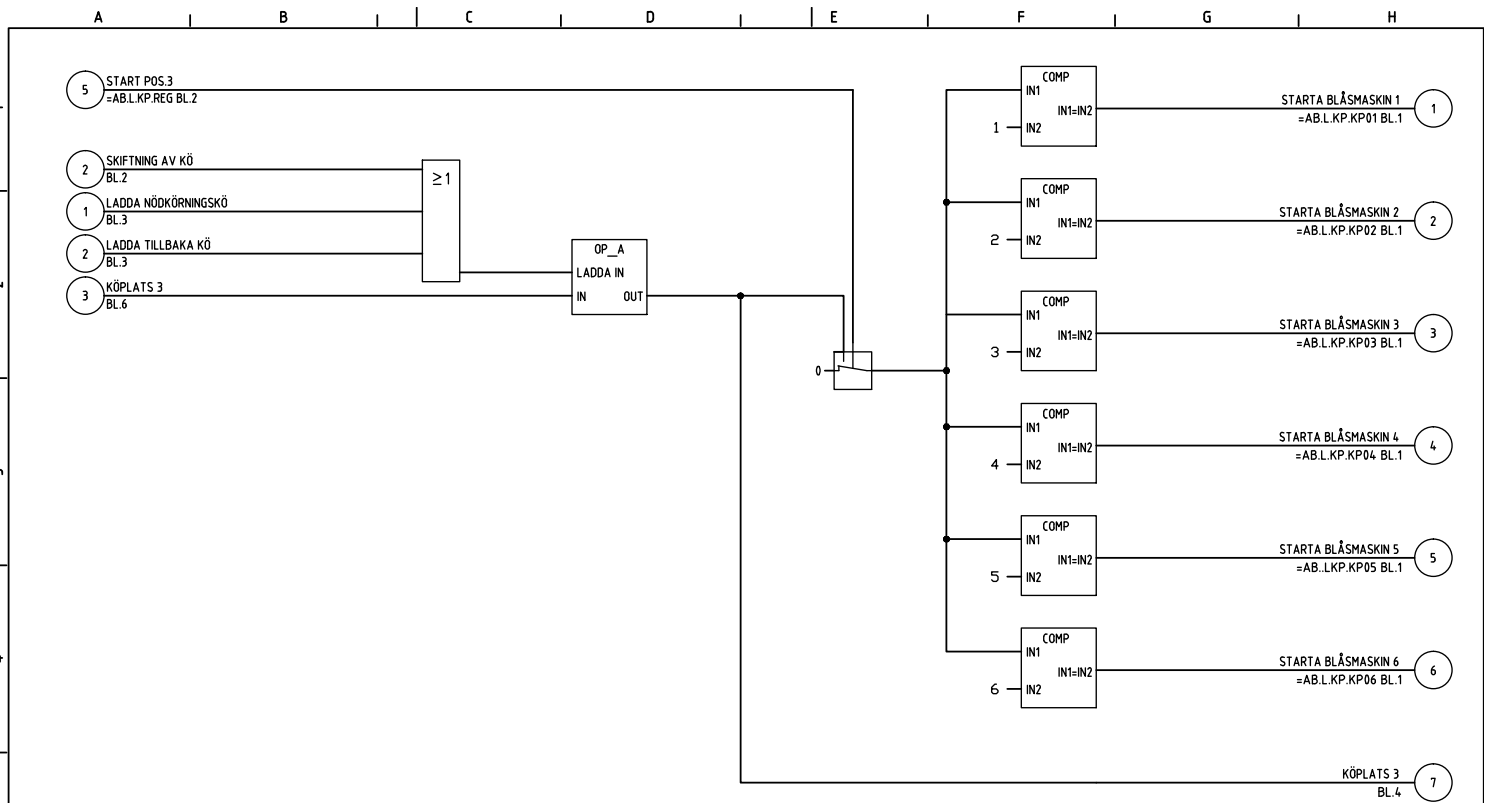
Dok.nr/filnamn =AB.L.KP.LOGIK&SFF001_6				Namn	Enhet	Datum	Bromma Reningsverk		Relationshandling		ÅF-nr. 400270	Ersätter objekt:		
				Konstr. JLE	ÅF	2012-05-07	LUFTNSYSTEM		Stockholm Vatten AB					
				Ritad JLE	ÅF	2012-05-07	LOGIK BLÅSMASKINER							
				Godkänd PSJ	ÅF	2012-05-07	FÖRREGLING OCH FUNKTIONSSCHEMA		TYPKRETS	STÄLLVERK	FACK	STATION PS203	PLAC	
Rev.	Revidering avser	Datum	Sign.	Godkänd							OBJEKT/NR =AB.L.KP.LOGIK	BLAD 6	FÖRTS. 7	REV



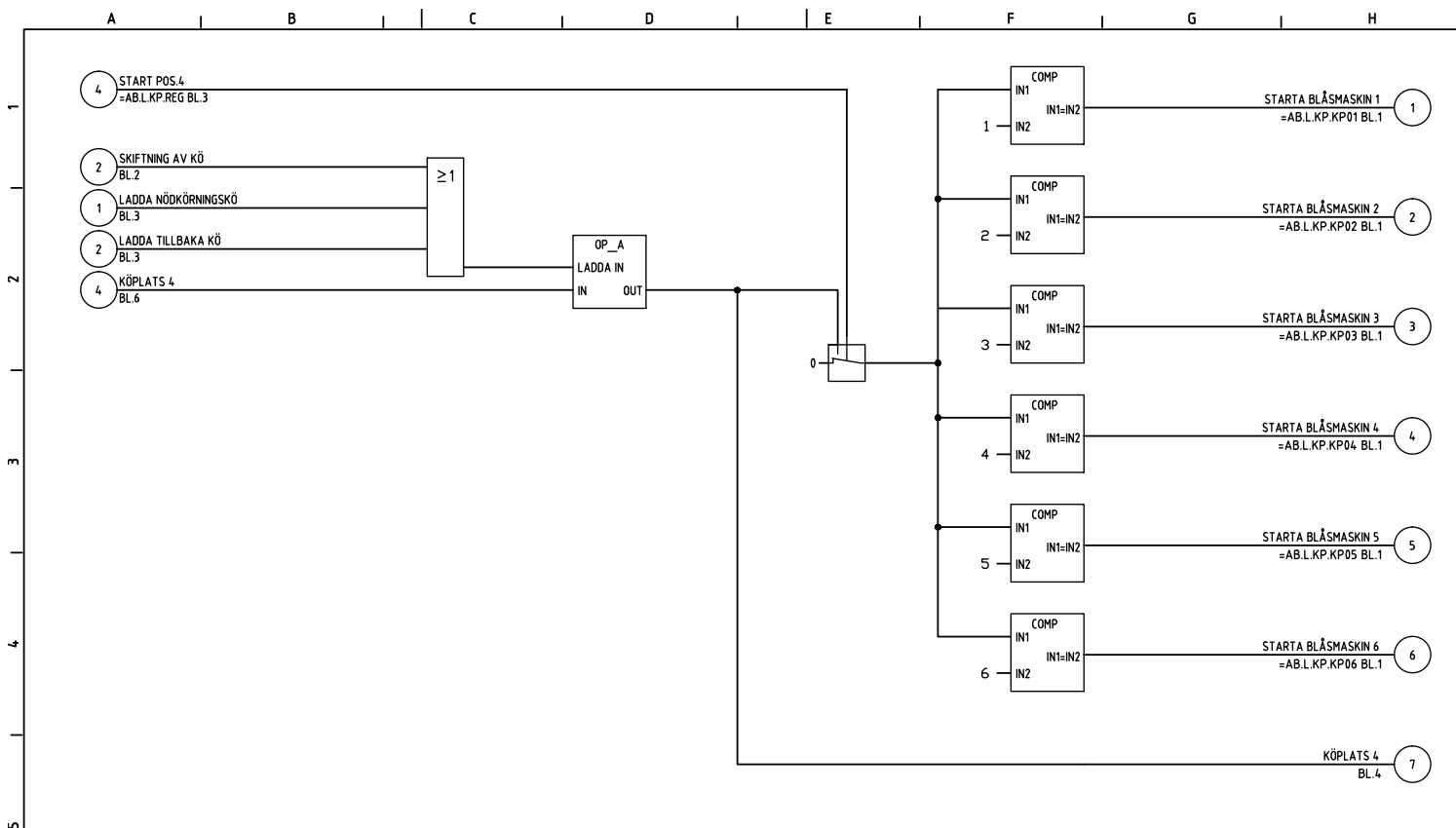
Dok.nr/filnamn =AB.L.KP.LOGIK&SFF001_7				Namn	Enhet	Datum	Bromma Reningsverk		Relationshandling		ÅF-nr. 400270	Ersätter objekt:			
				Konstr. JLE	ÅF	2012-05-07	LUFN.SYSTEM				Stockholm Vatten AB				
				Ritad JLE	ÅF	2012-05-07	LOGIK BLÅSMASKINER								
				Godkänd PSJ	ÅF	2012-05-07	FÖRREGLING OCH FUNKTIONSSCHEMA								
Rev.	Revidering avser	Datum	Sign.				TYPKRETS	STÄLLVERK	FACK	STATION PS203	PLAC	OBJEKT/NR =AB.L.KP.LOGIK	BLAD 7	FÖRTS. 8	REV



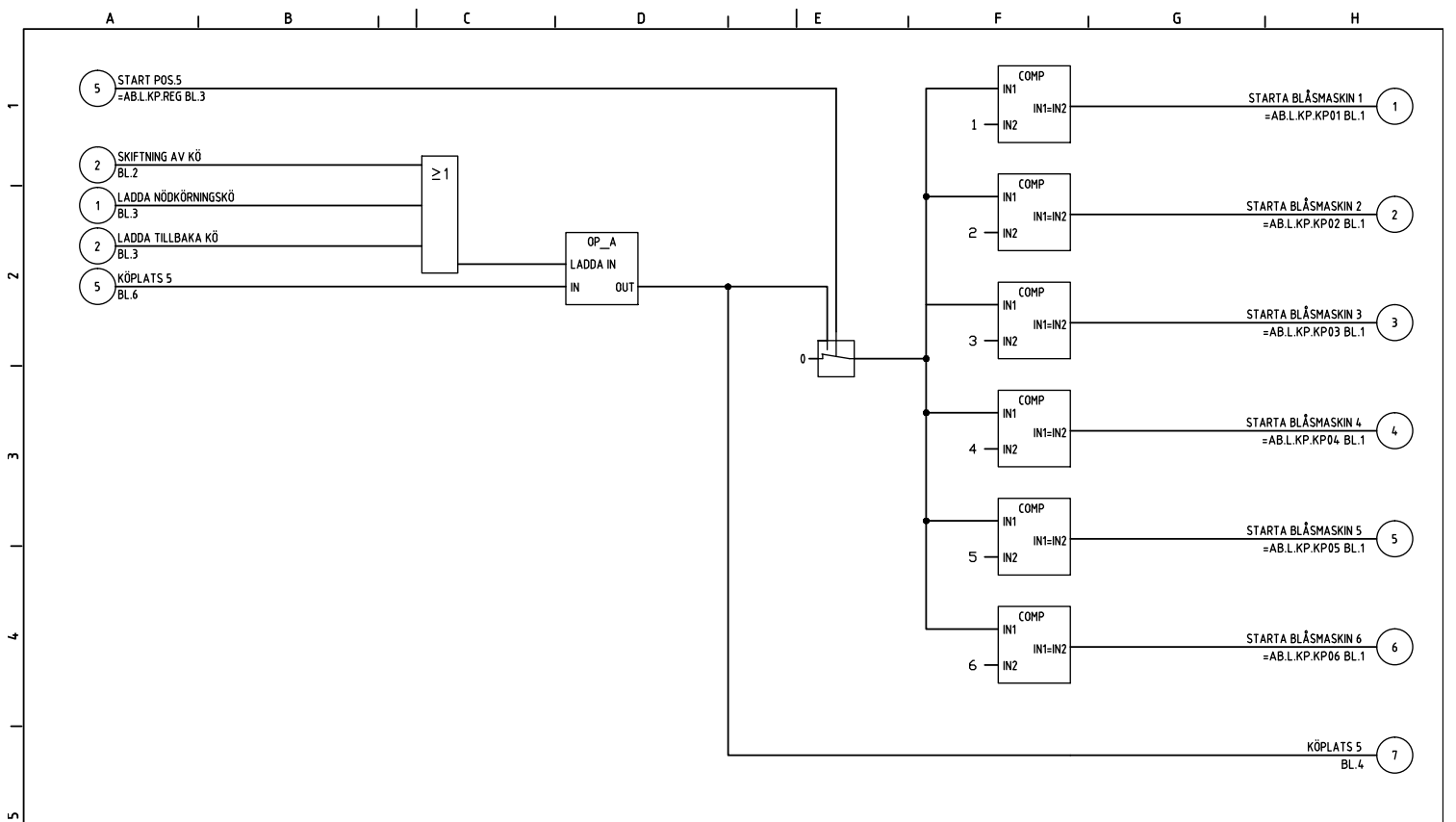
Dok.nr/filnamn =AB.L.KP.LOGIK&SFF001_8				Namn	Enhet	Datum	Bromma Reningsverk		Relationshandling		ÅF-nr. 400270	Ersätter objekt:			
				Konstr. JLE	ÅF	2012-05-07	LUFN.SYSTEM				Stockholm Vatten AB				
				Ritad JLE	ÅF	2012-05-07	LOGIK BLÅSMASKINER								
				Godkänd PSJ	ÅF	2012-05-07	FÖRREGLING OCH FUNKTIONSSCHEMA								
Rev.	Revidering avser	Datum	Sign.				TYPKRETS	STÄLLVERK	FACK	STATION PS203	PLAC	OBJEKT/NR =AB.L.KP.LOGIK	BLAD 8	FÖRTS. 9	REV



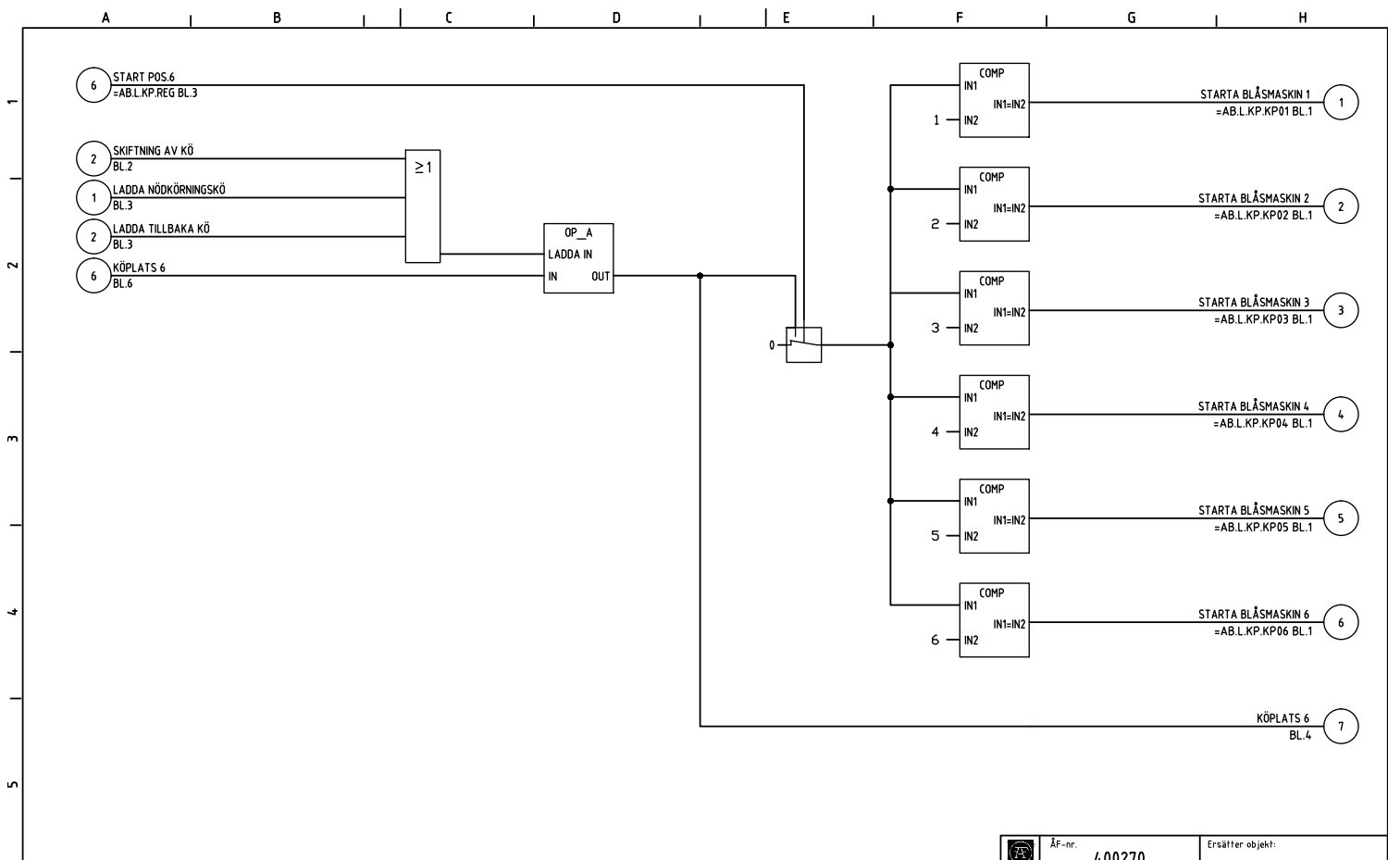
Dok.nr/filnamn =AB.L.KP.LOGIK&SFF001_9				Namn	Enhet	Datum	Bromma Reningsverk		Relationshandling		ÅF-nr. 400270	Ersätter objekt:			
				Konstr. JLE	ÅF	2012-05-07	LUFN.SYSTEM		Stockholm Vatten AB						
				Ritad JLE	ÅF	2012-05-07	LOGIK BLÅSMASKINER								
				Godkänd PSJ	ÅF	2012-05-07	FÖRREGLING OCH FUNKTIONSSCHEMA								
Rev.	Revidering avser	Datum	Sign.				TYPKRETS	STÄLLVERK	FACK	STATION PS203	PLAC	OBJEKT/NR =AB.L.KP.LOGIK	BLAD 9	FÖRTS. 10	REV



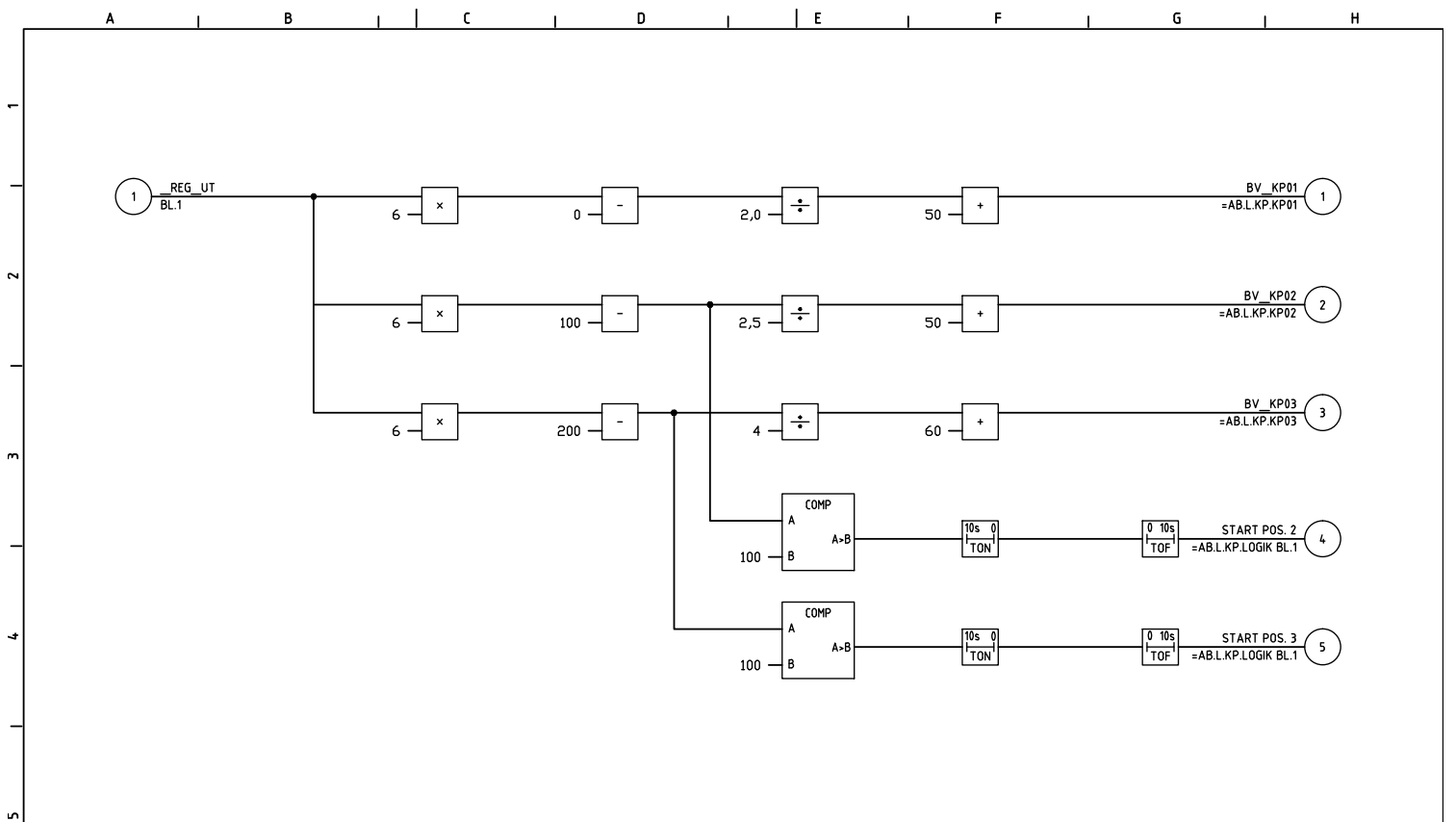
Dok.nr/filnamn =AB.L.KP.LOGIK&SFF001_10				Namn	Enhet	Datum	Bromma Reningsverk LUFN.SYSTEM LOGIK BLÅSMASKINER FÖRREGLING OCH FUNKTIONSSCHEMA		Relationshandling	ÅF-nr. 400270	Ersätter objekt:		
			Konstr. JLE	ÅF	2012-05-07					Stockholm Vatten AB			
			Ritad JLE	ÅF	2012-05-07					OBJEKT/NR =AB.L.KP.LOGIK	BLAD 10	FÖRTS. 11	REV
Rev.	Revidering avser	Datum	Sign.	Godkänd	PSJ	ÅF	2012-05-07	TYPKRETS	STÄLLVERK	FACK	STATION PS203	PLAC	



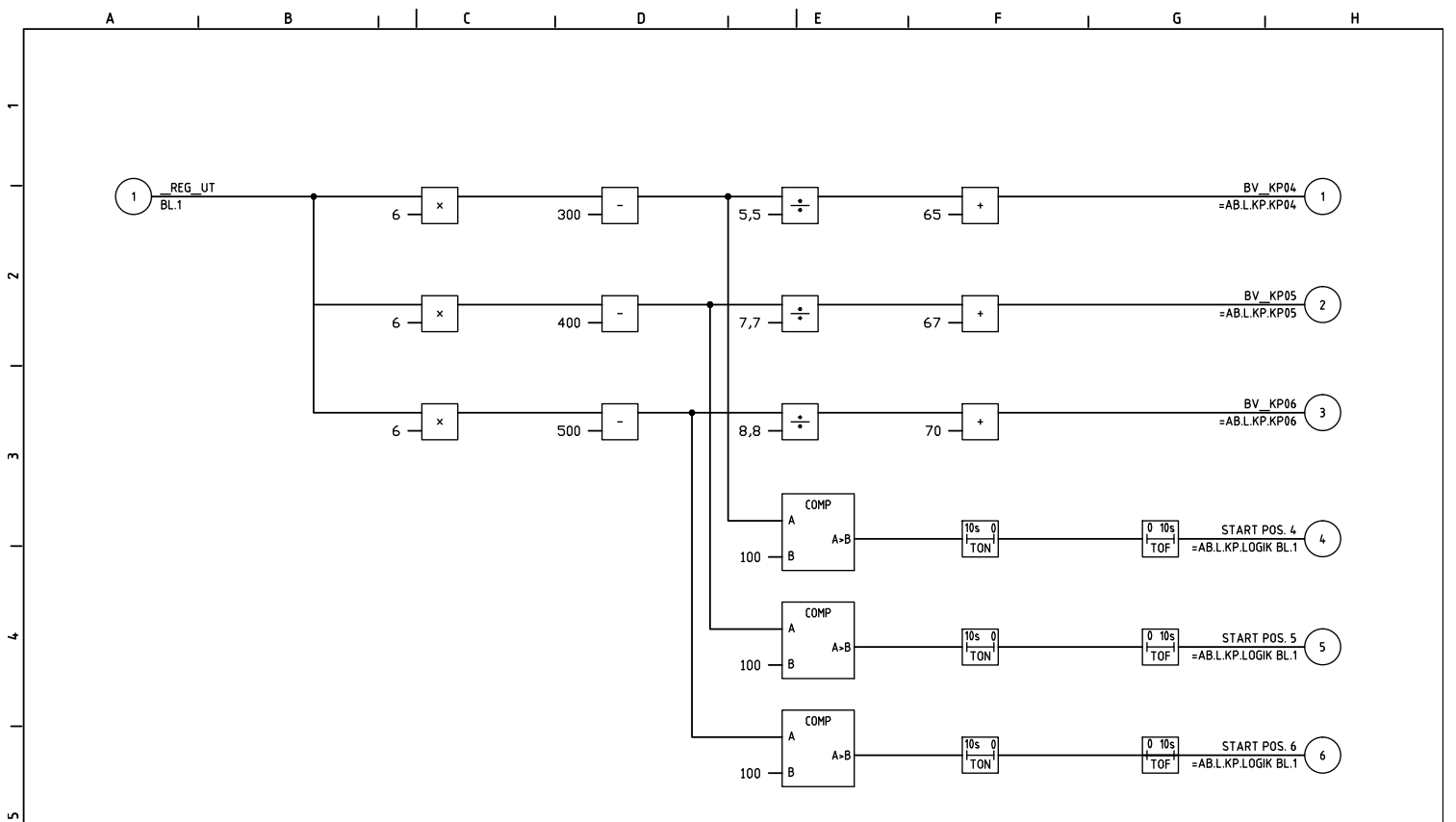
Dok.nr/filnamn =AB.L.KP.LOGIK&SFF001_11				Namn	Enhet	Datum	Bromma Reningsverk		Relationshandling		ÅF-nr. 400270	Ersätter objekt:			
				Konstr. JLE	ÅF	2012-05-07	LUFN.SYSTEM		Stockholm Vatten AB						
				Ritad JLE	ÅF	2012-05-07	LOGIK BLÅSMASKINER								
				Godkänd PSJ	ÅF	2012-05-07	FÖRREGLING OCH FUNKTIONSSCHEMA								
Rev.	Revidering avser	Datum	Sign.				TYPKRETS	STÄLLVERK	FACK	STATION PS203	PLAC	OBJEKT/NR =AB.L.KP.LOGIK	BLAD 11	FÖRTS. 12	REV



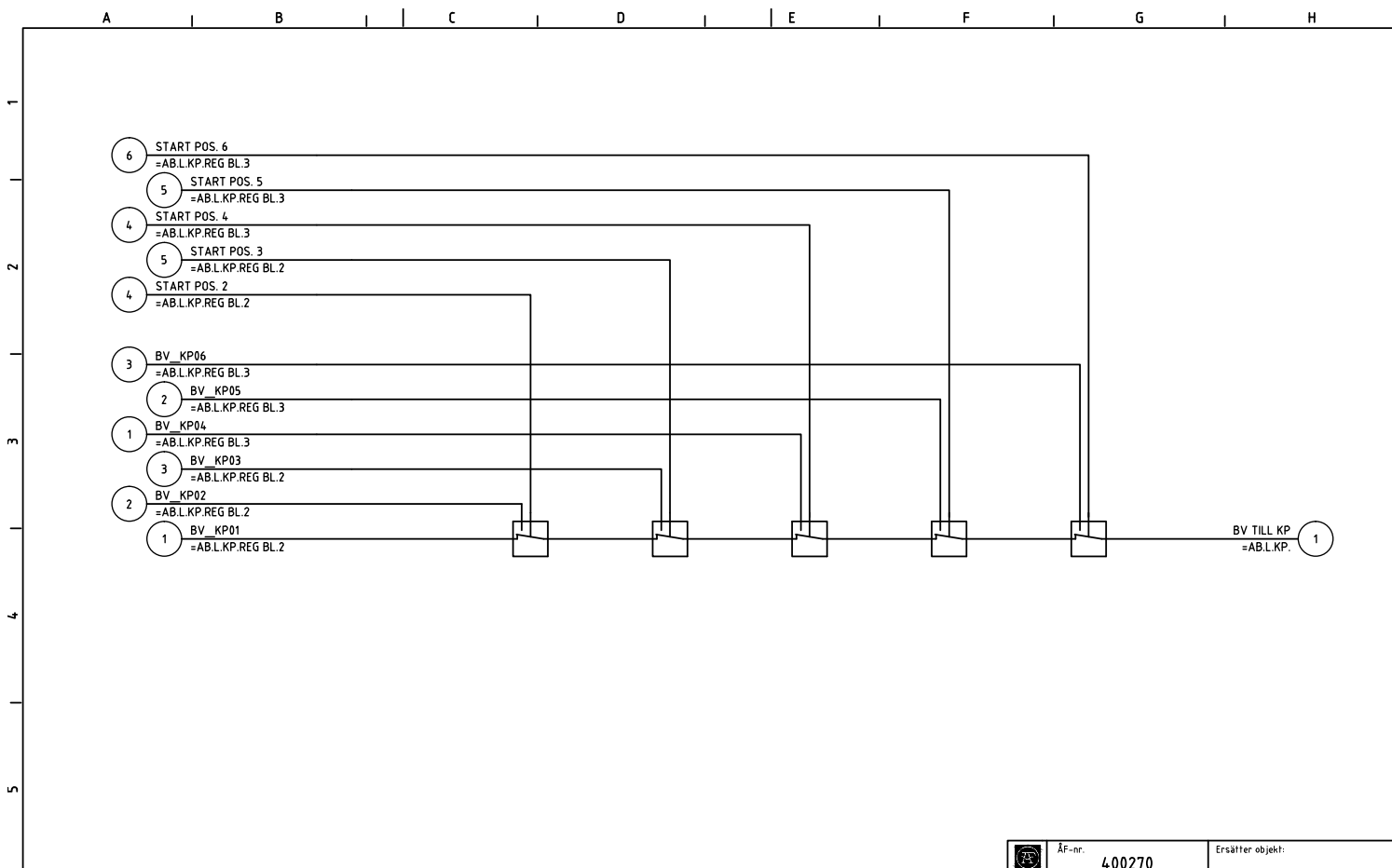
Dok.nr/filnamn		=AB.L.KP.LOGIK&SFF001_12		Namn	Enhet	Datum	Bromma Reningsverk		Relationshandling		ÅF-nr.	Ersätter objekt:		
				Konstr.	JLE	ÅF 2012-05-07	LUFTHSYSTEM				400270			
				Ritad	JLE	ÅF 2012-05-07	LOGIK BLÅSMASKINER				Stockholm Vatten AB			
				Godkänd	PSJ	ÅF 2012-05-07	FÖRREGLING OCH FUNKTIONSSCHEMA				OBJEKT/NR	BLAD	FÖRTS.	REV
Rev.	Revidering avser	Datum	Sign.				TYPKRETS	STÄLLVERK	FACK	STATION	=AB.L.KP.LOGIK	12	-	
										PS203				
										PLAC				



Dok.nr/filnamn =AB.L.KP.REG&SFF001_2				Namn		Enhet		Datum		Bromma Reningsverk LUFTHSYSTEM REGLERING TRYCK MANIFOLD FÖRREGLING OCH FUNKTIONSSCHEMA		Relationshandling		ÅF-nr. 400270		Ersätter objekt:							
				Konstr. JLE		ÅF		2012-05-07						Stockholm Vatten AB									
				Ritad JLE		ÅF		2012-05-07		TYPKRETS		STÄLLVERK		FACK		STATION PS203		PLAC					
Rev. Revidering avser				Datum		Sign.		Godkänd		PSJ		ÅF		2012-05-07		OBJEKT/NR =AB.L.KP.REG		BLAD 2		FÖRTS. 3		REV	



Dok.nr/filnamn =AB.L.KP.REG&SFF001_3				Namn	Enhet	Datum	Bromma Reningsverk LUFTH SYSTEM REGLERING TRYCK MANIFOLD FÖRREGLING OCH FUNKTIONSSCHEMA		Relationshandling	ÅF-nr. 400270	Ersätter objekt:		
			Konstr. JLE	ÄF	2012-05-07					Stockholm Vatten AB			
			Ritad JLE	ÄF	2012-05-07					OBJEKT/NR =AB.L.KP.REG	BLAD 3	FORTS. 4	REV
Rev.	Revidering avser	Datum	Sign.	Godkänd	PSJ	ÄF	2012-05-07	TYPKRETS	STALLVERK	FACK	STATION PS203	PLAC	



Dok.nr/filnamn		=AB.L.KP.REG&SFF001_4		Namn	Enhet	Datum	Bromma Reningsverk LUFTH SYSTEM REGLERING TRYCK MANIFOLD FÖRREGLING OCH FUNKTIONSSCHEMA		Relationshandling	ÅF-nr.	400270	Ersätter objekt:		
		Konstr.	JLE	ÅF	2012-05-07			Stockholm Vatten AB						
		Ritad	JLE	ÅF	2012-05-07			OBJEKT / NR	=AB.L.KP.REG	BLAD	4	FORTS.	-	
Rev.	Revidering avser	Datum	Sign.	Godkänd	PSJ	ÅF	2012-05-07	TYPKRETS	STÄLLVERK	FACK	STATION	PS203	PLAC	